

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra pružnosti a pevnosti

Využití programu PragTic pro účely odhadu životnosti
tažného zařízení osobního vozu

Use of PragTic Program for Purpose of Estimating Lifetime of
Car Towing Equipment

Student:

Bc. Vítězslav Labaj

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.

Ostrava 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vítězslav Labaj**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika
Téma: **Využití programu PragTic pro účely odhadu životnosti tažného zařízení
osobního vozu**
**Use of PragTic Program for Purpose of Estimating Lifetime of Car
Towing Equipment**

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s problematikou zkoušek tažných zařízení (ISO, Carlos)
2. Na zvoleném typu tažného zařízení provést napětíovou analýzu
3. Pomocí programu Prag-Tic navrhnout postup výpočtu životnosti tažného zařízení, který by mohl být použit v podmínkách Škoda-Auto
4. Provedení životnostní analýzy a porovnání s výsledky zkoušek

Seznam doporučené odborné literatury:

KUČERA, J. Stručný úvod do mechaniky lomu, Část 2 – Únava materiálu, skripta VŠB-TUO, 1994.
PAPUGA, J. Mapping of Fatigue Damages – Program Shell of FE-Calculation. PhD Thesis: Mechanics of Solids, Deformable Bodies and Continua branch, FSI ČVUT in Prague, 2005, 115s.
RŮŽIČKA, M. Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí. Učební texty. Ústav mechaniky FS ČVUT Praha, říjen 1998. [Cit 05/05/2003]
<http://mechanika.fs.cvut.cz/studium/literatura/k-211-html/ruza1/index.html>
ANSYS® Academic Teaching Advanced, Release 13.0, Help System ANSYS, Inc.
ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2011

Datum odevzdání: 21.5.2012



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Radimu Halamovi, Ph.D. za podporu, trpělivost a za cenné rady a připomínky a Ing. Květoslavu Zdražilovi za umožnění vypracování této diplomové práce.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu

V Ostravě 21.5. 2012

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21.5. 2012

.....
podpis studenta

Vítězslav Labaj

Sosnová 365/15, 73961, Třinec

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

LABAJ, V. *Využití programu PragTic pro účely odhadu životnosti tažného zařízení osobního auta: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojním Katedra pružnosti a pevnosti, 2012, 76 s. Vedoucí práce: Halama, R.

Tato diplomová práce se zabývá stanovením životnosti tažného zařízení osobního vozu namáhaného dle metodiky CARLOS TC. Cílem práce je pomocí programu PragTic navrhnout postup výpočtu životnosti tažného zařízení, který by mohl být použit v podmínkách Škoda – Auto. Druhotným cílem je popis samotného programu PragTic, jenž prochází rapidním vývojem, a posouzení zda je vhodný pro využití potřeb Škoda – Auto. Pro ilustraci použití programu PragTic v oblasti nízkocyklové únavy byl přidán příklad simulace silově řízené únavové zkoušky zkušebního tělesa.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

LABAJ, V. *Use of PragTic Program for Purpose of Estimating Lifetime of Car Towing Equipment: Diploma Thesis*. Ostrava: VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics 2012, 76 s. Thesis Head: Halama, R.

This diploma thesis focuses on determination of lifetime of car towing equipment loaded by CARLOS TC methodology. The aim of the thesis is to suggest procedure for calculation the lifetime of car towing equipment in PragTic software, which could be used in terms of Škoda – Auto. The secondary aim of this thesis is the description of the PragTic software. This software is passing through rapid development and whether is suitable for the Škoda - Auto needs. For better explanation of using PragTic software was added example of simulation force controlled fatigue test, focused on low cycle fatigue.

Obsah diplomové práce

Seznam použitých značek a symbolů.....	9
0. Úvod.....	11
1. Cyklické namáhání.....	12
1.1. Životnost při jednoosém namáhání.....	15
1.1.1. Wöhlerova křivka	15
1.1.1.1. Oblast kvazistatického lomu.....	17
1.1.1.2. Oblast cyklického tečení.....	17
1.1.1.3. Oblast nízkocyklová únavy (NCÚ)	17
1.1.1.4. Oblast vysokocyklové únavy (VCÚ).....	17
1.1.2. Manson – Coffinova křivka.....	18
1.1.3. Vliv středního napětí	19
1.1.4. Stádia únavového procesu	21
1.2. Životnost při víceosém zatěžování	22
1.3. Životnost při náhodném zatěžování.....	24
2. Metody predikce životnosti	25
2.1. Přístup predikce přes nominální napětí (NSA).....	25
2.2. Přístup predikce přes lokální elastická napětí (LESA).....	26
2.3. Přístup predikce přes lokální elasto-plastická napětí a deformace (LPSA).....	26
2.4. Přístup predikce přes lomovou mechaniku (FMA)	27
3. Program PragTic.....	28
3.1. Projekt FADOFF	28
3.2. Popis programu PragTic	30
3.3. Typy elementů použitelných v PragTicu.....	33
3.4. Soupis predikčních kritérií použitelných v PragTicu	34
3.4.1. Napěťová kritéria	35

3.4.2.	Deformační kritéria	39
3.4.3.	Energetická kritéria	39
4.	Výpočet v PragTicu	42
4.1.	Výpočet v oblasti nízkocyklové únavy	42
4.2.	Výpočet v oblasti vysokocyklové únavy	48
4.2.1.	Příprava v Ansysu	48
4.2.2.	Import dat do programu PragTic	54
4.2.3.	Výpočet v PragTicu	57
5.	Závěr	61
6.	Seznam použité literatury	64
7.	Seznam příloh	66

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
b	exponent cyklické pevnosti	[-]
c	exponent cyklické tažnosti	[-]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
ε_{ae}	amplituda elastické deformace	[-]
ε_{ap}	amplituda plastické deformace	[-]
ε_{at}	amplituda celkové deformace	[-]
ε'_f	součinitel cyklické tažnosti	[-]
$f_{.1}$	mez únavy pro symetrický střídavý tah-tlak	[-]
$f_{(c)}$	smyková složka napětí	[-]
$f_{(N)}$	normálová složka napětí	[-]
μ	Poissonovo číslo	[-]
I_1, I_2, I_3	invarianty napětí	[-]
N_f	počet cyklů do lomu	[-]
N_t	tranzitní počet cyklů	[-]
n'	exponent cyklického zpevnění	[-]
σ_a	amplituda napětí	[MPa]
σ_h	horní napětí	[MPa]
σ_n	dolní napětí	[MPa]
σ_m	střední napětí	[MPa]
σ_H	hydrostatické napětí	[MPa]

σ_{oct}	oktaedrické napětí	[MPa]
σ_f'	součinitel únavové pevnosti	[MPa]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	hlavní napětí	[MPa]
τ_{oct}	smykové oktaedrické napětí	[MPa]
τ_{max}	maximální smykové napětí	[MPa]
t_1	mez únavy pro symetrické střídavé kroucení	[MPa]
S_u	pevnost v tahu	[MPa]
S_y	mez kluzu	[MPa]
R	součinitel nesymetrie cyklu	[-]
K'	součinitel cyklické pevnosti	[-]

0. Úvod

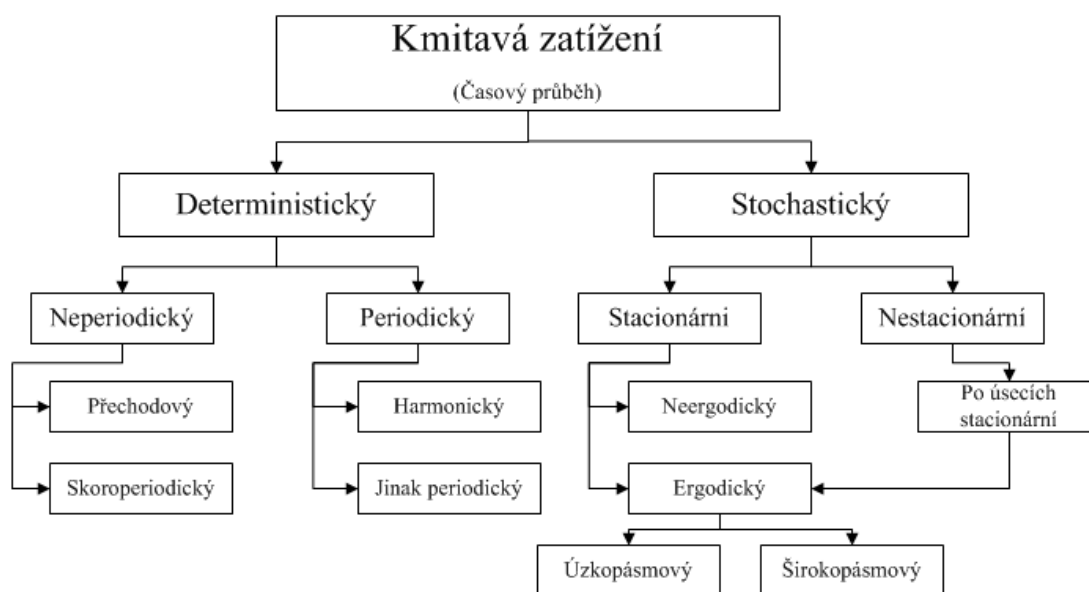
Mezním stavem únavy materiálu je definován stav, kdy v důsledku působení časově proměnných dynamických zatížení dojde k poruše funkční způsobilosti součástí. Charakteristické pro tento proces je to, že maximální hladina kmitavého napětí je mnohem nižší, než činí statická pevnost daného dílu. Jev „únavy materiálu“ je způsoben jinými faktory než únava biologická, jedná se o termín již historický. Výzkum únavy materiálu vstoupil do popředí s nástupem průmyslové revoluce, zejména budováním těžkého průmyslu a železniční dopravní sítě počátkem 19. Století. Nejstarší záznamy o poruchách v důsledku cyklického zatěžování pocházejí od německého inženýra W. A. J. Alberta z let 1829. Četné lomy železničních náprav vagónů, které se vyskytovaly až po absolvování několika miliónů kmitů, přivedli angličana W. J. M. Rankina k formulaci pojmu „únava materiálu“ roku 1843. V roce 1850 staví H. James a D. Galton v Anglii první únavový stroj. Dochází k závěru, že cyklická pevnost zkušebních vzorků činí přibližně třetinu pevnosti statické.

Systematicky s experimentálním výzkumem započal až německý železniční inženýr August Wöhler, který zformuloval empirické závěry mající obecnou platnost dodnes [1]:

- Pro lom součásti, který vzniká v důsledku opakovaného zatížení, je rozhodující počet změn zatížení a nikoli doba provozu.
- Poškození materiálu závisí na rozdílu maximálního a minimálního napětí v nebezpečném místě. Absolutní velikost má až druhořadý vliv.
- Výsledky zkoušek lze znázornit křivkami v souřadnicích napětí – počet kmitů
- Z experimentálních výsledků lze stanovit takové mezní napětí, pod nímž k únavovým lomům již nedochází.
- Geometrické vruby snižují únavovou pevnost a hodnotu závislou na tvaru vrubu a druhu materiálu.

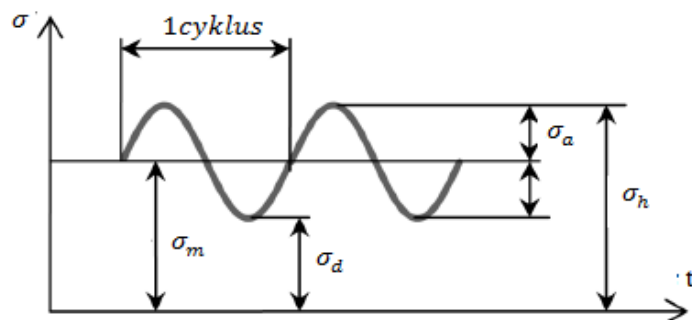
1. Cyklické namáhání

Výrazný vliv na pevnost konstrukcí má charakter časové závislosti zatěžujícího účinku. Průběhy zatížení mechanických soustav je možno rozdělit do skupin. A to na zatížení deterministické a na zatížení stochastické (obr. 1), které může být v závislosti na časové změně stacionární nebo nestacionární. K deterministickému zatížení můžeme přiřadit například harmonické zatížení nápravy železničního vagónu pohybujícího se po hladkých kolejkách. Mezi stochastické zatížení můžeme zařadit zatížení podvozku automobilu pohybujícího se po nerovném terénu[2].



Obr. 1 Klasifikace kmitavých procesů [1]

Způsob zatěžování má veliký vliv na výslednou hodnotu meze únavy a také na časovanou pevnost. Základními druhy únavového zatěžování jsou ohyb, krut a tah-tlak, přičemž jejich vztah k hodnotě meze únavy je závislý na materiálu. Typické cyklické napětí lze popsat podle obr. 2.



Obr. 2 Znázornění kmitu napětí [6]

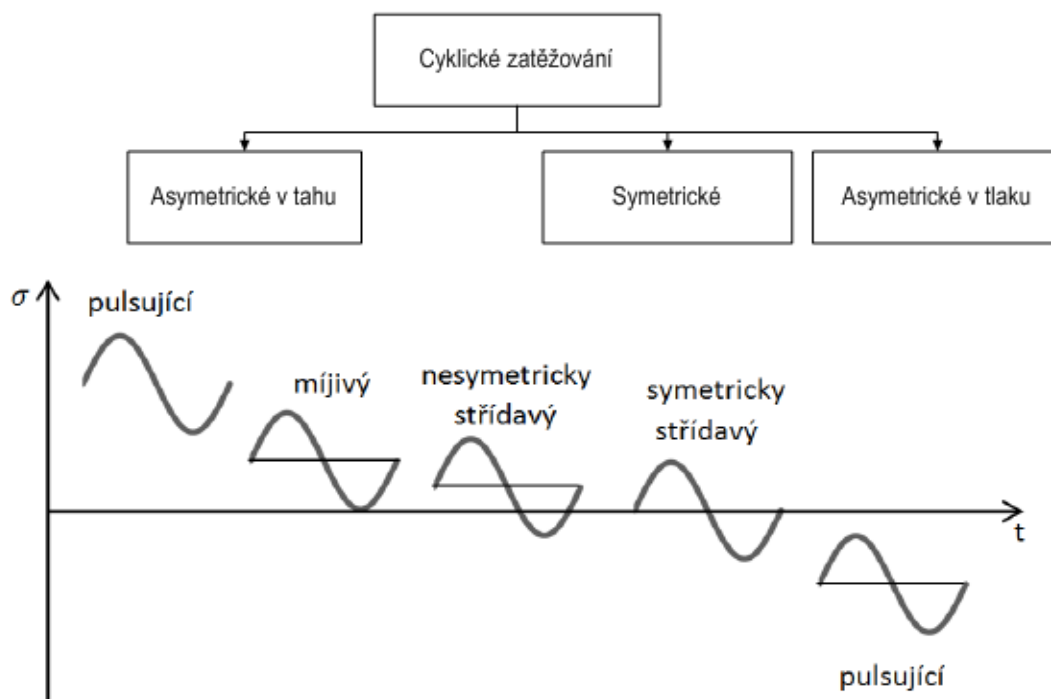
Pro amplitudu napětí σ_a a střední napětí σ_m platí vztahy:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2} \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2} \quad (2)$$

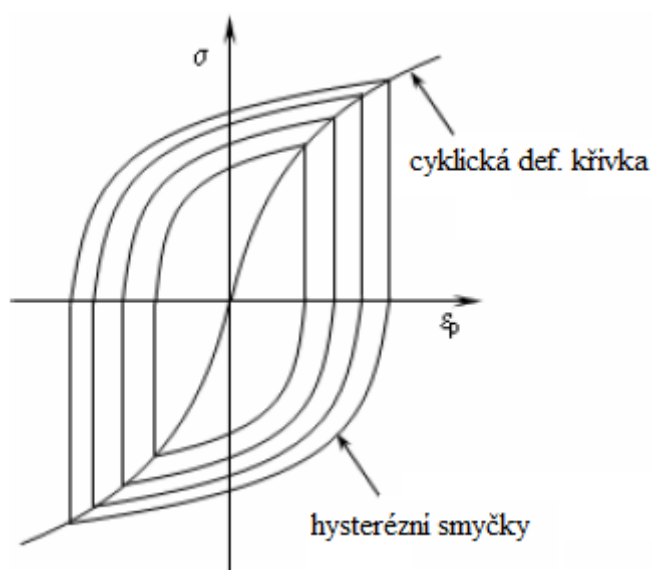
Jestliže střední napětí cyklu σ_m je rovno nule, jedná se o cyklus symetrický, ve všech ostatních případech, kdy je střední napětí různé od nuly, jde o asymetrický cyklus (asymetrický cyklus v tahu a tlaku, obr. 3). Pro posouzení asymetrie zátěžného cyklu byl zaveden součinitel nesymetrie cyklu R .

$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a} \quad (3)$$



Obr. 3 Typy cyklického zatěžování [6]

Na rozdíl od monotónně vzrůstajícího zatížení do lomu je únavové zatěžování typické svým časově proměnným průběhem. Při jednoosé únavové zkoušce na vzorku s harmonickým zatěžováním vykazuje materiálová odezva hysterezi v poměrné deformaci, kterou lze znázornit hysterezní smyčkou. Jednoosé namáhání je charakterizováno uzavřenou hysterezní smyčkou. Při proložení vrcholů několika hysterezních smyček, získaných v polovině životnosti, lze získat cyklickou deformační křivku (obr. 4).



Obr. 4 Cyklická deformační křivka

Vztah pro vyjádření cyklické deformační křivky můžeme vyjádřit ve tvaru:

$$\sigma_a = K' \cdot \varepsilon_{ap}^{n'}, \quad (4)$$

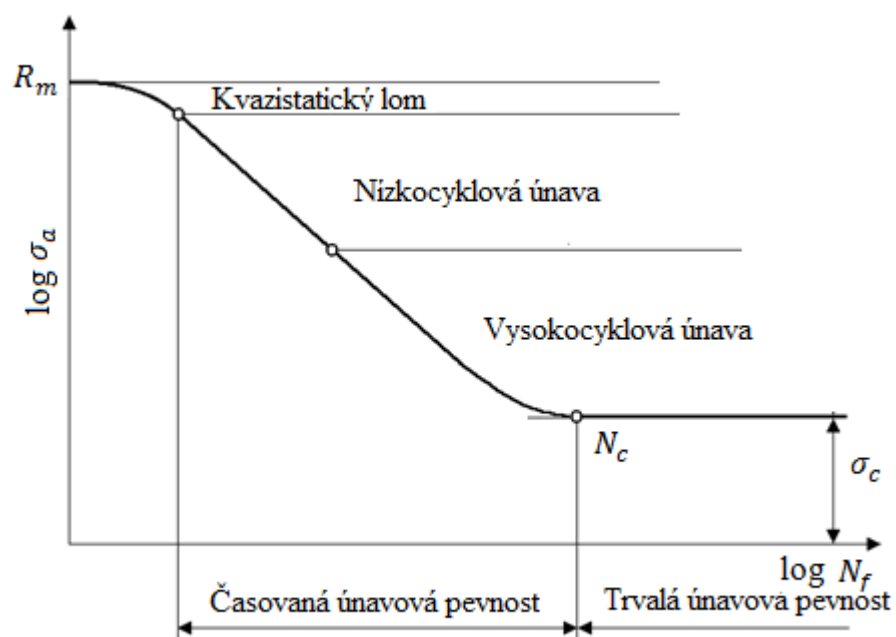
kde parameter n' je exponent cyklického zpevnění, K' je součinitel cyklické pevnosti a ε_{ap} je amplituda plastické deformace.

Rozlišují se dva druhy cyklického zatěžování vzorků a to měkké (zatěžování s řízenou amplitudou napětí) a tvrdé zatěžování (zatěžování s řízenou amplitudou poměrné deformace). Efekt cyklického změkčení (zpevnění) souvisí se změkčením (zpevněním) odezvy materiálu namáhaného cyklickým zatěžováním. U tvrdého zatěžování materiál vykazuje cyklické zpevňování, jestliže dochází ke zvětšování amplitudy napětí, což je typické pro žíhané materiály. V opačném případě se jedná o cyklické změkčování, jež je typické pro materiály s vyšší pevností.

1.1. Životnost při jednoosém namáhání

1.1.1. Wöhlerova křivka

Nejčastější charakteristikou sloužící k popisu únavového procesu je Wöhlerova křivka. Tato křivka popisuje závislost amplitudy napětí σ_a na počtu kmitů do lomu N_f . Průběh Wöhlerových křivek závisí na zkoušeném materiálu. Společným rysem pro všechny kovy a jejich slitiny je růst počtu cyklů do lomu N_f s poklesem amplitudy napětí σ_a . Křivka životnosti $\sigma_a - N_f$ může být konstruovaná pro různá střední napětí σ_m , která ovlivňují její průběh. Obvykle se experimentálně zjišťují pouze dvě $\sigma_a - N_f$ křivky, a to při symetrickém zátěžném cyklu ($\sigma_m = 0$) a při míjivém cyklu ($\sigma_m = \sigma_a$). Na obr. 5 a obr. 6 jsou zobrazena stádia dílčího únavového procesu. Pro oba diagramy je společný pokles amplitudy napětí s růstem počtu cyklů do lomu. Tuto oblast nazýváme časovanou únavovou pevností a je ohraničená zprava počtem cyklů N_c . Oblast s vyšším počtem cyklů $N > N_c$ nazýváme oblast trvalé únavové pevnosti [3].



Obr. 5 Wöhlerova křivka pro symetrické zatěžování



Obr. 6 Wöhlerova křivka pro míjivé zatěžování

Křivku životnosti s nesymetrickým cyklem (obr. 6) dělíme do čtyř oblastí, a to na oblast kvazistatického lomu, oblast cyklického tečení a oblast nízkocyklové a vysokocyklové únavy [1,3].

1.1.1.1. Oblast kvazistatického lomu

V této oblasti jsou zatížení tak velká, že k porušení tělesa dojde již během prvního půlcyklu nebo po několika cyklech (maximálně stovky cyklů). V tomto případě nedochází k porušení postupnou nukleací a růstem únavové trhliny, ale lomová plocha vykazuje znaky, které jsou typické pro případ statického porušení. Kvazistatický lom se vyskytuje při souměrně střídavých cyklech, kdy nedojde k cyklickému tečení.

1.1.1.2. Oblast cyklického tečení

Cyklické tečení neboli cyclic creep (ratcheting) nastává při měkkém zatěžování s nenulovou hodnotou středního napětí. Proces cyklického tečení je v podstatě akumulací plastické deformace při cyklickém zatěžování (postupný nárůst, popřípadě pokles, délky vzorku v případě jednoosého namáhání). V důsledku vyčerpání plastických schopností materiálu může dojít k poškození dříve než mechanismem nízkocyklové únavy. V praxi je tedy snahou navrhovat konstrukce tak, aby k cyklickému tečení nedocházelo.

1.1.1.3. Oblast nízkocyklové únavy (NCÚ)

Oblast nízkocyklové únavy spadá do životnosti v rozmezí 10^2 až 10^5 cyklů. Napětí v tělese jsou tak velká, že vznikají cyklické plastické deformace materiálu. Horní hranice této oblasti (10^4 až 10^5 cyklů) se vyznačuje určitými nespojitostmi Wöhlerovy křivky v oblasti meze kluzu materiálu R_e . Tyto nespojitosti mezi nízkocyklovou a vysokocyklovou oblastí lze vysvětlit rozdíly v rychlosti poškozování a rozdílnými rychlostmi ve stadiu nukleace únavové trhliny. Nízkocyklový únavový lom má obvykle hrubší strukturu s interkrystalickým průběhem lomu s výraznými stopami po plastické deformaci.

1.1.1.4. Oblast vysokocyklové únavy (VCÚ)

Oblast vysokocyklové únavy zahrnuje životnost vyšší než 10^5 cyklů. Pokud dojde k lomu, pak je charakterizován hladkým až hedvábným vzhledem a transkrystalickou strukturou bez zjevných známek plastické deformace. Snadno lze lom odlišit od zbylé části

lomové plochy, která se vytvoří náhlým kvazistatickým dodržením průřezu s podílem plastické deformace.

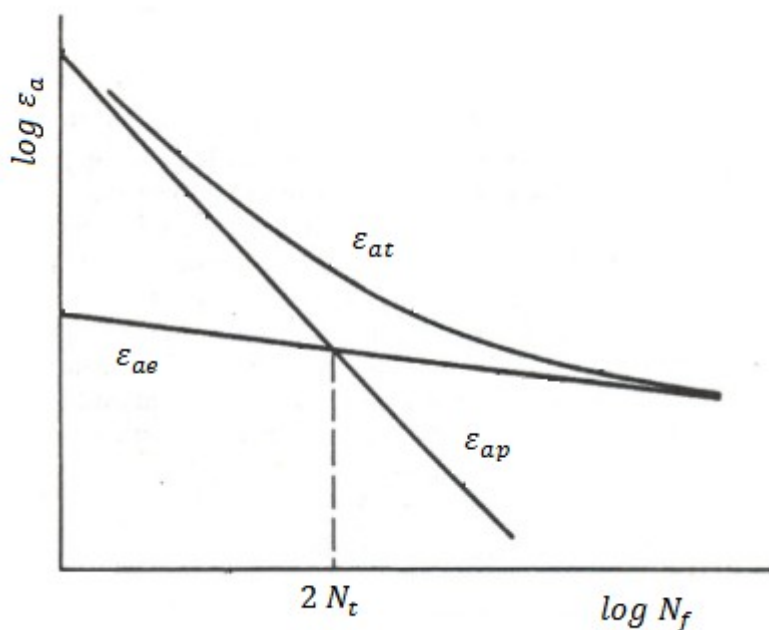
Křivku životnosti lze popsat jako závislost počtu cyklů do lomu N_f na amplitudě napětí σ_a :

$$\sigma_a = \sigma'_f \cdot (2 \cdot N_f)^b, \quad (5)$$

kde σ'_f představuje součinitel únavové pevnosti a b je exponent cyklické pevnosti.

1.1.2. Manson – Coffinova křivka

Manson – Coffinova křivka udává závislost amplitudy plastické deformace ε_{ap} na počtu cyklů do lomu N_f a je základem při výpočtu životnosti při nízkém počtu cyklů do lomu.



Obr. 7 Mason – Coffinova křivka

Na obr. 7 je znázorněn průběh plastické, elastické a celkové amplitudy deformace na počtu cyklů do lomu v bilogaritmické škále. N_t zde představuje tranzitní počet cyklů, jež představuje stejný rozsah amplitudy elastické a plastické deformace. Při malých počtech

cyklů do lomu převládá plastická složka ε_{ap} , naopak při vysokých počtech cyklů do lomu se prosazuje složka elastická ε_{ae} . Manson – Coffinovou křivku lze popsat vztahem:

$$\varepsilon_{at} = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma'_f}{E} (2 N_f)^b + \varepsilon'_f \cdot (2 N_f)^c \quad (6)$$

E	modul pružnosti v tahu
b	exponent cyklické pevnosti
σ'_f	součinitel cyklické pevnosti
c	exponent cyklické tažnosti
ε'_f	součinitel cyklické tažnosti

1.1.3. Vliv středního napětí

Střední napětí ovlivňuje celý únavový proces. Urychluje stádium šíření únavových trhlin a také zkracuje délku trhliny, při které dochází ke konečnému lomu.

- Podle Goodmana

Jedná se o rovnici přímky a má tvar:

$$\frac{\sigma_a}{f_{-1}} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1, \quad (7)$$

kde σ_a je mez únavy odpovídající střednímu napětí σ_m , f_{-1} je mez únavy zjištěná při symetrickém cyklu (mez únavy, nebo smluvní mez únavy), S_u představuje mez pevnosti. Pro tlaková střední napětí je rovnice (3) příliš nekonzervativní. Proto se v případě tlakových středních napětí jejich vliv na únavovou životnost neuvažuje a v diagramu je tato skutečnost nahrazena přímkou rovnoběžnou s osou x:

$$\frac{\sigma_a}{f_{-1}} = 1, (\sigma_m \leq 0). \quad (8)$$

Z rovnice (3) vyjádříme mez únavy při symetrickém cyklu a upravíme na tvar:

$$f_{-1,red} = f_{-1} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_u}\right) \quad (9)$$

- Podle Gerbera

Na rozdíl od Goodmana je Gerberova rovnice popsána parabolou, je omezená pouze na případy tahového středního napětí a má tvar:

$$\frac{\sigma_a}{f_{-1}} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2 = 1. \quad (10)$$

Při vyjádření meze únavy u symetrického cyklu dostaneme rovnici ve tvaru:

$$f_{-1,red} = f_{-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2\right]. \quad (11)$$

- Podle Soderberga

Soderbergova rovnice je zaměřena především pro křehké materiály a křivka má tvar:

$$\frac{\sigma_a}{f_{-1}} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1, \quad (12)$$

kde S_y představuje mez kluzu. Po vyjádření meze únavy při symetrickém cyklu dostaneme rovnici ve tvaru:

$$f_{-1,red} = f_{-1} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_y}\right) \quad (13)$$

- Podle SWT

Rovnice SWT je dána tvarem:

$$f_{-1} = \sqrt{f_{-1,red} \cdot (\sigma_m + f_{-1,red})}. \quad (14)$$

Po úpravě rovnice lze zapsat ve tvaru:

$$f_{-1,red} = \frac{\sigma_m}{2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{2 \cdot f_{-1}}{\sigma_m}\right)^2 + k} - k \right] \quad (15)$$

- Podle Bergmana

$$f_{-1} = \sqrt{f_{-1,red} \cdot (k \cdot \sigma_m + f_{-1,red})}, \quad (16)$$

po úpravě rovnice lze zapsat ve tvaru:

$$f_{-1,red} = \frac{\sigma_m}{2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{2 \cdot f_{-1}}{\sigma_m}\right)^2 + k} - k \right], \quad (17)$$

kde k je parametr, do něhož pokud dosadíme 1 dostaneme rovnici SWT. Hodnota parametru k , by se však měla pohybovat v rozmezí 0.4-0.7, přičemž nejlepších výsledků se dosáhne použitím $k = 0.4$.

1.1.4. Stádia únavového procesu

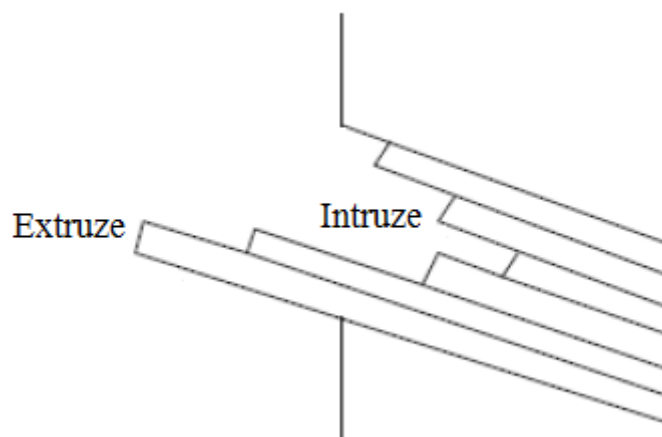
Proces únavové degradace popisující celkovou únavovou životnost konstrukčních prvků lze rozdělit do čtyř základních fází [4]:

- **Stádium změn mechanických vlastností**

Při cyklickém zatěžování dochází ke změnám mechanických vlastností materiálu, jejichž příčinou je změna hustoty a rozložení mřížkových poruch. Obecně je plastická deformace dána pohybem dislokací. Materiály dělíme podle odezvy na cyklické zatěžování na cyklický zpevňující a cyklický změkčující, případně se složenou deformační odezvou (prvně dochází ke zpevnění materiálu a následně ke změkčení). Cyklické změkčení je považováno za nežádoucí jev, jelikož při měkkém zatěžování, vzrůstá amplituda plastické deformace, což vede k efektivnějšímu poškozování. V těchto nukleačních místech dochází k iniciaci únavových mikrotrhlin.

- **Iniciace mikrotrhlin**

Rozlišujeme tři typy nukleačních míst. Prvním typem jsou skluzová pásma. Dále se jedná o hranice krystalických zrn, které omezují spojitost deformací a uplatňují se při vyšších teplotách. Třetím typem nukleačního místa je hranice mezi matricí a nekovovými inkluzemi. Nejčastěji se vyskytujícím nukleačním pásmem jsou skluzová pásma, jejichž tvorba zpravidla předchází i nukleaci v blízkosti hranic zrn a na rozmezí nekovového vměstku a matrice. Pokud dojde k pokluzu v jedné skluzové rovině krystalického zrna oceli, zpevní se tak, že k dalšímu pokluzu dojde již v sousední rovině. Na povrchu cyklicky zatěžovaného vzorku dochází ke vzniku takzvaných intruzí a extruzí (obr. 8), které zakončují na povrchu části únavová skluzová pásma. Takto vzniklé mikrovruby působí jako koncentrátoři napětí a dochází zde ke vzniku a šíření mikrotrhlin.



Obr. 8 Vznik intruzí a extruzí

- **Šíření mikrotrhliny**

V místě největšího nakupení mikrotrhlin dochází k jejich spojování v delší trhliny, sledující skluzové roviny jednotlivých zrn ve směru kolmém na směr hlavního napětí. Po dosažení dostatečné délky se mikrotrhliny začínají šířit i do hloubky vzorku pod povrch. Vzniklé mikrotrhliny dále rostou, až z důvodu nerovnoměrného rozložení napětí a deformace se některá z trhlin stane trhlinou řídící. Tato trhlina poté poroste značnou částí vzorku, zatímco u zbylých trhlin je jejich růst potlačen.

- **Lom**

Poslední fází únavového poškození je konečný náhlý lom. Jeho charakter se liší podle teploty tělesa a odolnosti materiálu proti křehkému lomu.

1.2. Životnost při víceosém zatěžování

Způsob zatěžování má velký vliv na výslednou hodnotu meze únavy a také na časovanou pevnost. Způsob zatěžování tělesa také ovlivňuje průběh teoretického napětí po průřezu. Víceosé zatěžování je nejčastěji se vyskytujícím způsobem zatěžování strojních součástí. Jednotlivé zatěžovací složky nemusí působit ve fázi, případně mohou působit

s různou frekvencí. Pro predikci pomocí multiaxiálních kritérií, se často definují únavové parametry na určitých specifických rovinách nebo se využívá deviátorů napětí. Významná napětí, jež jsou často používána při formulaci únavových kritérií, jsou napětí na oktaedrické rovině a napětí na rovině maximálních smykových napětí. Normálové napětí na oktaedrické rovině σ_{oct} je definováno vztahem:

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3} \cdot I_1, \quad (18)$$

kde I_1 představuje první invariant tenzoru napětí. Druhý a třetí invariant napětí lze vyjádřit pomocí rovnic:

$$I_2 = -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3) \quad (19)$$

$$I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3. \quad (20)$$

Smykové napětí v oktaedrické rovině τ_{oct} je dáno vztahem:

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)} \quad (21)$$

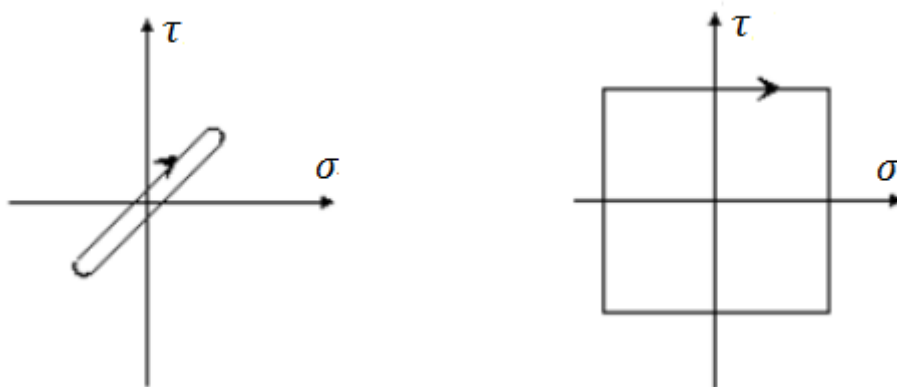
Normálové napětí v oktaedrické rovině se nazývá hydrostatické napětí σ_h a je definováno prostřednictvím normálového napětí:

$$\sigma_h = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3} \cdot I_1 = \sigma_{oct} \quad (22)$$

Rovinu maximálního smykového napětí lze definovat jako rovinu, jejíž umístění je stanoveno pomocí Mohrových kružnic. Velikost maximálního smykového napětí τ_{max} definujeme pomocí vztahu:

$$\tau_{max} = \max \left(\left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right|, \left| \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \right|, \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right| \right) \quad (23)$$

U víceosého namáhání lze únavový cyklus popsat pomocí zatěžovací cesty (uzavřené trajektorie v napětíovém prostoru). Proporcionální zatěžování nastává, je-li poměr mezi normálovým napětím a smykovým napětím konstantní (obr. 9 vlevo). Pokud není, jedná se o neproporcionální zatěžování a mění se poměr normálového a smykového napětí (obr. 9 vpravo).



Obr. 9 Proporcionální a neproporcionální napětí

1.3. Životnost při náhodném zatěžování

Případy, kdy strojní součásti jsou zatěžovány konstantní amplitudou napětí nebo deformace, se v praxi vyskytují jen ojediněle. Většinou je průběh působících sil velmi složitý. K řešení problému kumulativního poškození, tj. pro predikci životnosti tělesa, je třeba znát velikost, posloupnost a frekvenci působících napětí v kritických místech včetně jejich středních hodnot. Protože se obvykle při výpočtu poškození pracuje s amplitudami napětí, převádí se deformační průběhy na průběhy napětí za předpokladu elastické deformace. Tento předpoklad není obecně platný, zejména při vysokých amplitudách deformace a při použití tvárných materiálů. Amplituda plastické deformace je řídicím parametrem. Z tohoto důvodu postupy, které neuvažují plastickou deformaci v průběhu jednotlivých zátěžných cyklů, vnášejí jednu z vážných chyb do celkové kalkulace životnosti. Stejně tak i klasifikační metody průběhu deformace nebo napětí mohou vážně ohrozit pravdivost vypočítaných počtu cyklů do lomu. Z těchto důvodů se musí věnovat pozornost vyhodnocení průběhů deformací a napětí s respektováním hystereze mezi napětím a deformací a s uvážením plastické deformace. Údaje o historii tenzoru napětí a tenzoru deformací spolu s komplexními údaji o únavových vlastnostech materiálu včetně křivek životnosti, představují vstupní data do rovnice pro výpočet kumulace poškození a životnosti, vyjádřené celkovým počtem cyklů do výsledného lomu tělesa.

2. Metody predikce životnosti

Metody odhadu životnosti konstrukčních prvků včetně jejího experimentálního ověření byly a jsou předmětem neustálého výzkumu, avšak výsledky metod nejsou dosud obecně platné. Dostatečně uspokojivých výsledků lze docílit v laboratorních podmínkách při úzce vymezených předpokladech a interpretaci získaných výsledků. Při určování životnosti součástí v průmyslové praxi, se vyskytuje mnoho faktorů ovlivňujících její výsledný odhad jako například rozptyl provozních podmínek, multiaxiální charakter namáhání, neznámá kritická místa, neznámé kritické délky poruch, problematický výpočet nominálních napětí, rozptyly materiálových vlastností. Konkrétní výpočtové postupy predikce životnosti, které jsou v dnešní době nejpoužívanější lze rozdělit do čtyř skupin:

2.1. Přístup predikce přes nominální napětí (NSA)

Metoda NSA (Nominal Stress Analysis) je historicky nejstarší metodou navrhování konstrukcí na únavu, byla navržena v roce 1870. Tato metoda má stále uplatnění pro komponenty vyznačující se vysokocyklovou únavou (navrhování na trvalou i omezenou životnost). Metoda využívá korekci středního napětí nejčastěji podle Goodmana nebo Gerbera. Metoda se vyvíjela společně s hodnocením tvarové pevnosti částí, založené na vztahování špiček napětí ve vrubech k hladině nominálního namáhání, která bylo možno určit na základě klasických analytických postupů používaných v pružnosti a pevnosti.

Potřebné vstupní informace jsou[5]:

- Časový průběh nominálních napětí v kritickém řezu zpracovaný některou z metod dekompozice signálu. Způsob dekompozice ovlivňuje výsledky.
- Experimentální únavová křivka napětí (Wöhlerova křivka) získaná experimentálně nebo odvozená. Často se stává, že pro nedostatek podkladů je křivka odvozována z Wöhlerových křivek pro tělesa s vruby i pro tělesa hladká, takzvaných „syntetických únavových křivek“. Musí být uváženy všechny faktory, které souvisejí s přenositelností modelových zkoušek na součást, jako je vliv koncentrace a gradientu napětí, vliv jakosti povrchu, vliv velikosti součásti, vliv středního napětí atp.

- Smithův nebo Haighův diagram pro korekci křivek únavy na střední napětí, popřípadě některý ze vztahů pro vyjádření ekvivalentní amplitudy napětí.

Predikce je založená na lineární kumulaci únavového poškození (Palmgrenova-Minerova hypotéza). Predikovaná životnost patří mezi střední tzv. mediánovou s pravděpodobností výskytu lomu 50%. Predikci je možno zpřesnit použitím relativního srovnání životností experimentálně, tzv. relativní Palmgramova-Minerova hypotéza.

2.2. Přístup predikce přes lokální elastická napětí (LESA)

Metoda LESA (Local Elastic Stress Analysis) používá vztah mezi velikostí lokálního elastického napětí a počtem cyklů do porušení a používá se pro navrhování na omezenou životnost. Tato metoda je jakousi modifikací metody NSA. Je použitelná v oblasti vysokocyklové únavy a využívá korekce středního napětí podobně jako metoda NSA. Pro účely predikování poškození v lokalitách s různým extrémem a gradientem napětí je postup modifikován, aby byl ekvivalentní postupu metody NSA. U metody LESA se využívá stejných únavových křivek. Rozdíl je v tom, že u metody LESA je možno použít k výpočtu poškození jedinou únavovou křivku napětí, a to pro hladký nevrubovaný vzorek. Výpočet únavového poškození může být proveden pomocí libovolně zvolené metody kumulace poškození a interpretuje se jako život do vzniku technické makrotrhliny v kontrolovaném místě (zpravidla jsou trhliny 0,5 mm až 1 mm dlouhé).

2.3. Přístup predikce přes lokální elasto-plastická napětí a deformace (LPSA)

Metoda LPSA (Local Plastic Strain Analysis) byla navržena v roce 1950. Je založená na testování materiálu na základě deformací v souvislosti s lokálními deformacemi podle cyklů za účelem iniciace makroskopické trhliny. Tento přístup umožňuje analýzu elasto-plastické deformace kritických míst. Je použitelná i pro analýzu v oblasti nízkocyklové únavy. Vstupní informace do metody LPSA jsou:

- Historie zatěžování, která je pro stochastické zatížení dána jako časová posloupnost jednotlivých extrémů zátěžného procesu, případně je k dispozici již zpracovaný záznam ve formě jedno nebo dvouparametrického spektra zatížení (rain flow matrix).

- Únavové vlastnosti materiálu, reprezentované únavovou křivkou. Jelikož základem metody je deformační chování lokálního objemu materiálu, používá se Mason-Coffinova křivka.
- Konstitutivní závislost mezi napětím a deformací při cyklickém zatěžování (cyklická deformační křivka).

2.4. Přístup predikce přes lomovou mechaniku (FMA)

Metoda FMA (Fracture Mechanics Analysis) se využívá v leteckém průmyslu při výpočtu přípustného poškození (damage tolerance), které umožňuje spolehlivou kontrolu trhliny určité velikosti. Tento přístup umožňuje sledování růstu trhliny po cyklu. Vstupními informacemi jsou:

- Časový průběh nominálního napětí nebo napětí v blízkosti čela trhliny. Záznam je uvažován ve své přirozené časové posloupnosti, nebo bývá zpracován některou z metod dekompozice signálu.
- Experimentální křivky šíření trhliny na modelových vzorcích pro danou asymetrii kmitu nebo jeho střední hodnotu a pro danou tloušťku materiálu.

Následuje postup přenesení modelových výsledků na kritické místo, s uvážením konkrétní konfigurace trhliny v tělese a zahrnutím dalších faktorů jako například vliv středního napětí kmitu, vliv odlišné tloušťky materiálu, teploty aj. Integrací rovnice šíření získáme růstové křivky trhliny (křivky počet kmitů-délka trhliny), do níž dosazením kritické hodnoty délky trhliny determinují zbytkovou životnost kritického místa konstrukce. Pokud chceme vypočítat celkovou životnost, je zapotřebí k výsledkům predikce šíření trhliny přičíst ještě počet kmitů potřebných pro iniciaci defektu podle jakékoliv dříve uvedené metody.

3. Program PragTic

Program PragTic je bezplatný software, který je dlouhodobě vyvíjen pro automatizovanou analýzu únavového poškození na základě výpočtu provedených pomocí MKP. Autorem programu PragTicu je Ing. Jan Papuga, Ph.D. Tento program vznikl společně s přípravou disertační práce autora na podporu výpočtu. V současné době je PragTic zamýšlen jako program určený především pro zkvalitnění a zjednodušení výzkumné práce. PragTic má sloužit uživatelům různého zaměření na konečnoprvkový program. Společně pro všechny MKP programy je schopnost připravit ASCII soubor, který se mírně liší podle použitého MKP programu ve struktuře zápisu. ASCII soubor obsahuje informace o modelu a výsledky napětí či deformace v jednotlivých uzlech. Program PragTic využívá vlastní databázi pro přístup k datům. Jejím základem je rozdělení užívaných dat do separátních binárních souborů tak, aby byl zjištěn rychlý přístup k požadovaným informacím a ty nemusely být v trvalé paměti počítače. Většinu subjektů nashromážděných v databázi si můžeme prohlédnout nebo i přímo v programu upravit. Výpočty v PragTicu lze spustit na vybranou skupinu uzlů hned několika výpočetními metodami současně. Program PragTic v současnosti nedisponuje žádným grafickým prohlížečem výsledku. Výsledky je možno si prohlédnout v programu, nebo je popřípadě exportovat jako formátový výstup. Pro grafické znázornění výsledku je možno načíst tento výstup do některého z MKP programu.

3.1. Projekt FADOFF

V dnešní době je řešen pod vedením autora programu projekt FADOFF (Fatigue Analysis Documentation Office), jehož výsledkem by měla být komerční verze PragTicu. Hlavní prioritou je zejména vývoj programu jak v komerční verzi, tak ve verzi freewarové. Software pro výpočet únavy je poměrně drahou záležitostí, proto je cílem aby PragTic byl přístupný i pro malé výpočetářské firmy, a to nejen cenou, ale i průhledností implementovaných metod a popisem očekávatelné predikční schopnosti. Dochází k úplnému přerodu programu. Z původního programovacího jazyku C/C++ v prostředí Borland C++ Builder, jenž byl určen pro platformu Windows, se připravuje přechod k rozhraní HTTP/HTML s verzí pro Windows i pro Linux. Cílem je také umožnění spouštění více úloh na stejném počítači, případně na vzdáleném serveru či na jiných po síti dostupných počítačích.

Dalším tématem je rozšíření databází týkajících se podkladů pro výpočetní únavové analýzy na internetu, ať už z hlediska provázání nebo množství dat. V současné době dobíhá dostavba na www.practic.com ale v budoucnu se databáze přesune na www.fadoff.cz. Databáze je dělena do témat věnující se únavové analýze. Projekt by měl být podporován Technologickou agenturou až do roku 2014 [7].

- RefDB

Jedná se o databázi dostupných knih a článků z oblasti únavy materiálu. Tato databáze původně zachycovala pouze bibliografickou citaci, případně internetový odkaz. Nyní databáze obsahuje celé abstrakty článků a ty jsou děleny obsahově do jednotlivých témat. Články je zde možno i manuálně vkládat.

- MatDB

Zde se jedná o databáze materiálů. Patří mezi nejnavštěvovanější stránky webu. Plánuje se rozšíření směrem k proprietárním údajům a přenesení na www.fadoff.cz.

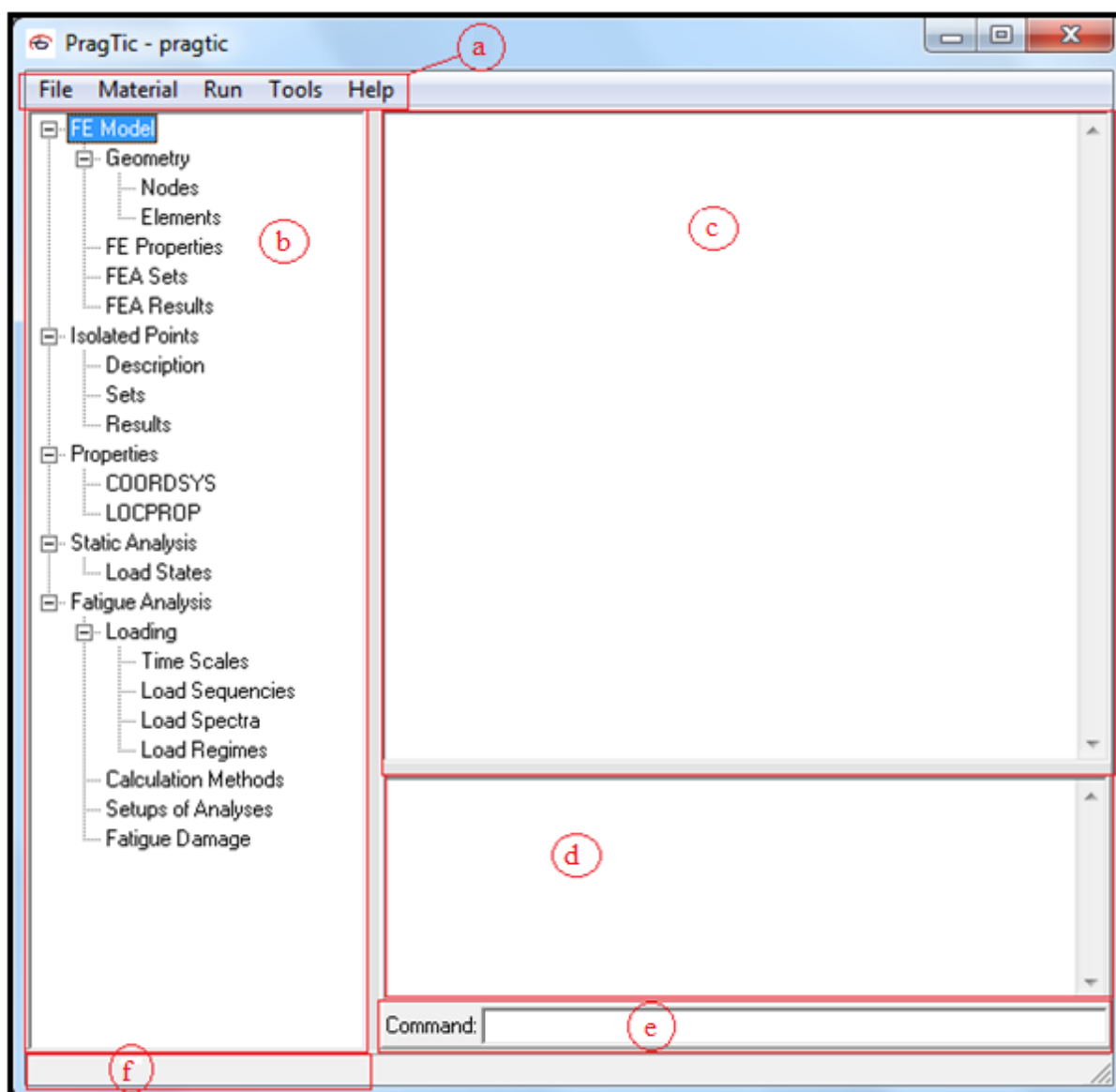
- FatLim

Jedná se o databázi mezi únavy. FatLim jednak shrnuje všechna použitá data a jednak nabízí výsledky výpočetní predikce celé řady metod.

- FinLiv

Databáze pro ukládání a správu experimentálních únavových dat. Plně funkční je zatím pro S-N křivky, pro Manson-Coffinovy bude zprovozněna během roku 2012. Připravuje se zde tutoriál pro vkládání nových položek, který bude umístěn v záhlaví stránky a také vyhledávač.

3.2. Popis programu PragTic



Obr.10 Hlavní okno programu

Hlavní okno PragTicu je rozděleno do šesti částí:

a) Main menu

Hlavní menu se nachází v horní části hlavního okna a dále se dělí na:

File - zde jsou soustředěny základní operace pro práci se soubory.

New/Open – přes tento příkaz lze vytvořit novou databázi, nebo otevřít již stávající.

Save As - pomocí tohoto příkazu lze uložit databázi do daného adresáře s daným jménem. Soubor má příponu *.fdb.

ASCII Printout – slouží k uložení dat do textových souborů.

View Database – tento příkaz poskytuje informace o všech vektorech. Každý vektor je vypsán do jednoho řádku a k němu jsou vypsány informace, jako je jméno, umístění, typ proměnné a počet proměnných.

Import – pomocí příkazu „Import“ lze načíst jednotlivé informace o uzlech, elementech a soubory výsledků.

Material – Mat. Database- pomocí tohoto příkazu se spustí databáze materiálu.

Run - kliknutím na položku „Run“ se aktivuje okno sloužící ke spuštění výpočtové analýzy.

Tools - tato položka umožňuje pracovat s funkcemi, popřípadě upravovat jednotlivé soubory.

FE Model – tento příkaz slouží k práci s uzly nebo s elementy konečnoprvkového modelu.

Statistics – zde je jeden příkaz „Get Quantil“, který počítá hustotu pravděpodobnosti funkce Gaussova rozdělení s přesností aproximace 0.00045.

Loads – tímto příkazem je možno provádět operace na lokálních zatíženích, která jsou už načtená v databázi PragTicu.

Results – zde lze pracovat s výsledkovými soubory a dále je zpracovávat.

Arrays – slouží k upravování souborů zátěžných sekvencí.

Material – tento příkaz slouží k vypočítání nebo k ověření správnosti již vypočítaných materiálových hodnot. Je zapotřebí vložit soubor s experimentálními daty Wöhlerovy křivky.

Help – slouží k otevření manuálu PragTicu.

b) Database tree

Stromová databáze se nachází v levé části hlavního okna a je rozdělena do pěti hlavních částí.

FE-model – zahrnuje definici uzlů a elementů dohromady s parametry prvků skupiny

Geometry – geometrie je definována pomocí uzlů a elementů. Žádné jiné subjekty popisující konečnoprvkový model se do PragTicu neimportují. Jako první se musí načítat informace o uzlech a až poté samotné elementy, jelikož elementy jsou na uzlech závislé. Pokud nastane, že při importu se načte uzel, který není přiřazen žádnému elementu, PragTic ho automaticky vytvoří.

FE Properties – tato položka je složena z proměnných elementů skupiny a reálných konstant. Obě tyto položky jsou závislé na daném konkrétním typu elementu a jejich struktura je definovaná v knihovně elementů.

FEA Sets – obsahují informace o sadách uzlů nebo elementů. Tyto sady jsou buď přímo nainportovány, nebo mohou být vytvořeny přímo v PragTicu. Tyto sady lze filtrovat různými způsoby, například podle velikosti napětí, čímž dojde ke zredukování počtu uzlů a následně ke kratšímu početnímu času.

FEA Results – výsledky mohou být definované v uzlech, na elementech, popřípadě ve středu elementu.

Isolated Points – po uzlech a elementech, jsou izolované body dalším subjektem, na kterém lze počítat únavové poškození. Izolované body jsou náhradou za konečnoprvkový model. Používají se v případě, kdy není nutné importovat konečnoprvkový model do PragTicu.

Description – vzhledem k tomu, že izolované body nemají jakýkoliv vztah ke konkrétní struktuře, musí být vytvořeny přímo v PragTicu. Každý izolovaný bod vytvořený v PragTicu má své ID-name a souřadnice. Izolované body jsou definovány v souřadném kartézském systému.

Sets – podobně jako „FEA Sets“ obsahují informace o sadách izolovaných bodů. Lze je upravovat, filtrovat stejně jako uzly nebo elementy.

Results – každý izolovaný bod má svou jednu sadu výsledků. Ve srovnání s „FEA Results“ jsou výsledky týkající se izolovaných bodů jednodušší.

Properties – zde patří vlastnosti subjektů, které jsou společné ať už pro izolované body nebo konečnoprvkový model.

COORDSYS – týká se nastavením souřadnicového systému. Lze vybrat mezi kartézským, cylindrickým a sférickým souřadnicovým systémem.

LOCPROP – nastavení vlastností struktury. Lze nastavit drsnosti povrchu (leštěný, broušený, vyhlazený, válcovaný, kovaný) a také technologii zpracování (válcované, tvrzené plamenem, cementované, aj.).

MATERIAL – nastavení druhu materiálu. Spuštěním se otevře databáze materiálů.

Static Analysis – Load States – statická analýza.

Fatigue Analysis – únavová analýza

Loading – zatížení může být založeno na několika typech zdrojů.

Time Scales – je sled časových okamžiků, ve kterém jsou zaznamenány zatížení.

Load Sequencies – záznam zatížení bez souvisejícího časového údaje.

Load Spectra – spektrum zatížení může být importováno nebo vloženo pomocí příkazového řádku.

Load Regimes – režim zatížení je kombinací všech zatížení a jejich vlivu na strukturu, které se uskuteční během stejného časového období.

Calculation Method – týká se nastavením zvolených výpočetních metod.

Setups of Analyses – slouží ke spuštění výpočtové analýzy. K spuštění lze použít i tlačítko „Run“ v hlavním menu. Analýza únavového poškození může být spuštěna v následujících variantách:

Load Regimes sheet – zde je definována většina režimu zatížení.

Calculation Methods sheet – zde se nacházejí všechny výpočetní metody v rámci daného úkolu.

On Nodes/Elements/Isolated Points sheet – zde jsou definovány všechny sady uzlů, elementů a izolovaných bodů, na kterých bude spuštěná analýza.

Fatigue Damage – slouží pro operaci s výsledkovými soubory.

c) Report window

Nachází se na pravé straně hlavního okna. Okno slouží k vypisování všech upozornění a chyb. Rovněž si zde lze prohlédnout průběh výpočtu únavového poškození.

d) Command line history

Okno je v pravé části a zde se vypisují všechny příkazy, které se během nastavení analýzy použijí.

e) Command line

Jedná se o příkazový řádek, který slouží k rychlejšímu zadávání příkazů.

f) Status bar

Nachází se ve spodní části okna. Zobrazuje se zde záznam únavové analýzy a všechny různé informace o výpočetních metodách, metodách zatížení, atd.

3.3. Typy elementů použitelných v PragTicu

Do PragTicu lze importovat data z několika konečnoprvkových programů. Elementy, které se dají použít v PragTicu, jsou uvedeny v tab. 1.

MKP program/prvky	ABAQUS	ANSYS	COSMOS	FEMAP	MSC.NASTRAN
3D	C3D4	SOLID45	SOLID	BRICK8	CTETRA
	C3D6				
	C3D8	SOLID92		WEDGE6	CPENTA
	C3D10	SOLID95			
	C3D15				SOLID183
	C3D20	SOLID186			
	C3D20R				
	C3D27R				
2D	--	--	SHELL4	--	CTRIAR
					CTRIA3
					CTRIA6
					CQUADR
					CQUAD4
					CQUAD8
					CSHEAR
1D	--	--	--	--	CBAR
					CBARL
					CBARM
					CBARML
					CONROD
					CTUBE

Tab. 1. Výčet použitelných elementů

3.4. Soupis predikčních kritérií použitelných v PragTicu

Predikční kritéria lze rozdělit z několika hledisek. Obecně lze rozdělit kritéria na kritéria napěťová, deformační a energetická. Další dělení je například na kritéria uniaxiální a multiaxiální. V PragTicu lze použít tato kritéria:

- **Uniaxiální**
 - Kritérium podle SWT
 - Kritérium podle Landgrafa
 - Kritérium podle Bergmanna
 - Kritérium podle Edgoran& Robertse
 - Kritérium podle Heitmanna
 - Kritérium podle Feltnera

- Kritérium podle Morrowa
- Kritérium podle Pospíšila
- Kritérium podle LESA
- **Multiaxiální**
 - Kritérium podle Socie
 - Kritérium podle Wang&Brown
 - Kritérium Findleyho definovaného podle Socie
 - Kritérium podle Crosslanda a Sinese
 - Kritérium podle Findleyho
 - Kritérium podle McDiarmida
 - Kritérium podle Matakaeho
 - Kritérium podle Carpinteri & Spagnoliho
 - Kritérium podle Papugy PCr
 - Kritérium podle Dang Vana
 - Kritérium podle Papadopulose

Nyní budou stručně jednotlivá kritéria popsána.

3.4.1. Napět'ová kritéria

Tato kritéria jsou vhodná spíše pro oblast vysokocyklové únavy, při které je těleso v makroskopicky elastickém stavu. Dimenzování ve vysokocyklové únavě je založeno na posouzení, zdali součást vydrží nekonečné zatěžování. Používané vzorce této skupiny, lze přepsat jako kombinaci smykového napětí C a normálové napětí N , přičemž se předpokládá, že smyková složka C ovládne proces poškození, zatímco u normálové složky lze předpokládat nějaký vedlejší efekt:

$$a \cdot f(C) + b \cdot g(N) \leq f_{-1}, \quad (24)$$

kde parametr $f(C)$ představuje smykovou složku napětí, $g(N)$ normálovou složku napětí a f_{-1} je mez únavy pro symetricky střídavý tah-tlak.

Ideální stav může být dosažen v případě, kdy data na levé straně rovnice odpovídají experimentálně zjištěné mezi únavy. Odchylku od ideální rovnosti ukazuje tzv. únavový index (25). Predikce pro experimentálně ověřenou predikci by měla vést k $LHS = RHS$ ($\Delta FI = 0$). Pokud je levá strana rovnice vyšší, součást může selhat i při nižším zatížení.

$$\Delta FI = \left(\frac{LHS(load) - RHS(material)}{RHS(material)} \right) \cdot 100\%, \quad (25)$$

LHS levá strana rovnice

RHS pravá strana rovnice

- Kritérium podle Crosslanda a Sinese

[8],[9]

Obě tato kritéria jsou si velice podobná. Základem je amplituda druhého invariantu tenzoru napětí. Do rovnice je dále přidán první invariant tenzoru napětí, který představuje hydrostatický tlak. Zatímco Crossland doporučoval nejvyšší hodnotu hydrostatického tlaku:

$$a_c \cdot (\sqrt{J_2})_a + b_c \cdot \sigma_{H,max} \leq f_{-1}, \quad (26)$$

Sines preferoval použití se střední hodnotou:

$$a_s \cdot (\sqrt{J_2})_a + b_s \cdot \sigma_{H,max} \leq f_{-1} \quad , \quad (27)$$

$$a_c = a_s = \frac{f_{-1}}{t_{-1}}, b_c = \left(3 - \sqrt{3} \cdot \frac{f_{-1}}{t_{-1}}\right), b_s = 6 \frac{f_{-1}}{f_0} - \sqrt{3} \cdot \frac{f_{-1}}{t_{-1}} \quad (28)$$

J_2 druhý invariant tenzoru napětí

$\sigma_{H,m}$ maximální hodnota hydrostatického napětí

f_0 mez únavy v míjivém tahu

t_{-1} mez únavy pro symetrické střídavé kroucení

- Kritérium podle Findleyho

[10]

Findleyho kritérium patří mezi rovinná predikční kritéria. Koeficienty Findley stanovil z jednoosé zkoušky. Výpočet obou materiálových proměnných je založen na dvou provedeních, na symetrickém střídavém tahu a tlaku.

$$a_F \cdot C_a + b_F \cdot N_{max} \leq f_{-1}. \quad (29)$$

$$a_F = 2 \cdot \sqrt{\frac{f_{-1}}{t_{-1}} - 1}, b_F = 2 - \frac{f_{-1}}{t_{-1}} \quad (30)$$

- Kritérium podle McDiarmida

[11]

McDiarmid stanovil koeficienty na základě rozsáhlého testování:

$$\frac{f_{-1}}{t_{AB}} C_a + \frac{f_{-1}}{2 \cdot s_u} N_{max} \leq f_{-1}, \quad (31)$$

kde t_{AB} je mez únavy v symetrickém střídavém krutu s trhlinou v systému A nebo B. Pro typ A je charakteristická trhlina rovnoběžná s povrchem. U typu B vede trhlina dovnitř směrem od povrchu.

- Kritérium podle Matakeho

[12]

Matakeho kritérium je zapsáno v podobné formě jako Findleyho kritérium. Rozdíl je pouze v definici kritické roviny, což je rovina s maximální amplitudou smykového napětí C_a

$$a_M \cdot C_{a,MSSR} + b_M \cdot N_{max,MSSR} \leq f_{-1}, \quad (32)$$

$$a_M = \frac{f_{-1}}{t_{-1}}, b_M = 2 - \frac{f_{-1}}{t_{-1}}. \quad (33)$$

- Kritérium podle Carpinteri & Spagnoliho

[13]

Toto kritérium využívá také koncepce kritické roviny. Ve srovnání s Matakeho kritériem, výsledky vycházejí podobně. Kritérium je formulováno ve tvaru

$$\sqrt{a_S \cdot C_a^2 + b_S \cdot N_{max}^2} \leq f_{-1}, \quad (34)$$

$$a_S = \left(\frac{f_{-1}}{t_{-1}}\right)^2, b_S = 1. \quad (35)$$

- Kritérium podle Papugy PCr

[14]

Toto multiaxiální kritérium patří mezi novější kritéria a je vyvíjeno společně s programem.

$$\sqrt{a_c \cdot C_a^2} + b_c \cdot N_a + \frac{t_{-1}}{f_0} \cdot N_a \leq f_{-1}, \quad (36)$$

kde materiálové parametry jsou nastaveny v závislosti na typu materiálu. Pokud je poměr mezi únavy ($\kappa = \frac{f_{-1}}{t_{-1}}$)

$$\kappa < \sqrt{\frac{4}{3}} \cong 1.155, \text{ pak: } a_c = \frac{\kappa^2}{2} + \frac{\sqrt{\kappa^4 - \kappa^2}}{2}, b_c = f_{-1}, \quad (37)$$

$$\kappa \geq \sqrt{\frac{4}{3}} \cong 1.155, \text{ pak: } a_c = \left(\frac{4\kappa^2}{4+\kappa^2}\right), b_c = \frac{8f_{-1} \cdot \kappa^2 \cdot (4-\kappa^2)}{(4+\kappa^2)^2}. \quad (38)$$

- Kritérium podle Dang Vana

[15]

Dang Vanovo kritérium patří mezi mesoskopická kritéria. Tato kritéria mají společné, že ne makroskopické množství, ale jeho mesoskopický protějšek je třeba kontrolovat na únavu. Dang Van prezentoval způsob transformace mesoskopického množství vzhledem k makroskopickému napětí. Řešení v PragTicu se vztahuje pouze na mez únavy. Kritérium je ve tvaru:

$$a_{DV} \cdot C_a + b_{DV} \cdot \sigma_{H,max} \leq f_{-1} \quad (39)$$

$$a_{DV} = \frac{f_{-1}}{t_{-1}}, b_{DV} = 3 - \frac{3}{2} \cdot \frac{f_{-1}}{t_{-1}} \quad (40)$$

- Kritérium podle Papadopolose

[16]

Toto kritérium navazuje na Dang Vana v mesoskopických kritériích. Na rozdíl od Dang Vana se Papadopolos rozhodl pro integraci vstupních proměnných ve všech rovinách

$$\sqrt{a_P \cdot \langle T^2 \rangle} + b_P \cdot \sigma_{H,max} \leq f_{-1} , \quad (41)$$

$$a_P = 5 \cdot \left(\frac{f_{-1}}{t_{-1}} \right)^2, b_P = 3 - \sqrt{3} \cdot \frac{f_{-1}}{t_{-1}} \quad (42)$$

- Kritérium Findleyho definované podle Socie

[17]

Socie navrhl změnu Findleyho kritéria, pro pokrytí potřeb vysokocyklové únavy ve tvaru, kde je obsažena pouze elastická část únavové deformační křivky. Jedná se o napěťové kritérium, které umožňuje použití pro konečnou životnost. Rovnice má tvar

$$C_a + k \cdot N_{max} = \tau'_f \cdot (2N_f)^b \quad (43)$$

- Kritérium podle Pospíšila

[18],[5]

Pospíšilovo kritérium není dostatečně v dokumentaci PragTicu popsáno, níže uvedený popis vychází z publikace [5]. Tato metoda zavádí do rovnice životnosti tzv. nepoškozující amplitudu cyklické plastické deformace ε_{ac} .

$$\sigma_{a,fic} = \left\{ \sigma'_f \cdot \left[(2N_f)^c + \frac{\varepsilon_{a,c}}{\varepsilon'_f} \right]^{\frac{b}{c}} \right\}^m \cdot \left\{ \sigma'_f \cdot \left[(2N_f)^c + \frac{\varepsilon_{a,c}}{\varepsilon'_f} \right]^{\frac{b}{c}} + E \left[\varepsilon'_f \cdot (2N_f)^c + \varepsilon_{a,c} \right] \right\}^{(1-m)} \quad (44)$$

Pro nesymetrické kmity se za levou stranu rovnice dosazuje ekvivalentní amplituda napětí, která zohledňuje střední napětí:

$$(\sigma_{a,fic})_{eq} = \sigma_{a,fic} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{h,y}}{\sigma_{a,y}}}, \quad (45)$$

kde $\sigma_{h,y}$ je přizpůsobené horní napětí, $\sigma_{a,y}$ je amplituda napětí daného pokmitu.

3.4.2. Deformační kritéria

- Kritérium podle Landgrafa

[19]

Za poškozující parametr je zde považována amplituda celkové deformace ve vrubu. Rovnici životnosti tvoří popis Manson-Coffinovy únavové křivky s uvažováním středního napětí σ_m .

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} \cdot (2N_f)^b + \varepsilon'_f \cdot (2N_f)^c \quad (46)$$

- Kritérium podle Wang & Browna

[20]

$$\begin{aligned} \frac{\Delta g_{\max}}{2} + S \cdot e_{\text{eff}} = [1 + \mu + (1 - \mu) \cdot S] \cdot \frac{\sigma'_f - 2N_m}{E} \cdot (2N_f)^b + \\ + [1 + \mu_p + (1 - \mu_p) \cdot S] \cdot \varepsilon'_f \cdot (2N_f)^c \end{aligned} \quad (47)$$

N_m normálové napětí na kritické rovině

S Wang & Brownův parametr

Δg_{\max} maximální rozkmit smykové deformace na kritické rovině

e_{eff} efektivní normálová deformace na kritické rovině

μ Poissonovo číslo pro elastický stav materiálu

μ_p Poissonovo číslo pro plastický stav materiálu

3.4.3. Energetická kritéria

Tato kritéria, využitelná v oblasti nízkocyklové únavy, jsou založena na předpokladu, že o životnosti rozhoduje celková deformační práce akumulovaná do okamžiku lomu, případně virtuální hustota deformační energie akumulovaná do okamžiku lomu. Jednomu cyklu pak odpovídá akumulovaná práce, která je úměrná ploše hysterezní smyčky, případně zahrnuje i komplementární část.

- Kritérium podle SWT

[21]

Kritérium podle SWT používá jako poškozující parametr ekvivalentní amplitudu napětí, kterou navrhli Smith, Wetzel a Topper.

$$\sigma_{a,eq} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m) \cdot \sigma_a} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m) \cdot E \cdot \varepsilon_a} \quad (48)$$

$$\sigma_{max} \cdot \varepsilon_a = \frac{\sigma_f'^2}{E} \cdot (2N)^{2b} + \sigma_f' \cdot \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^{b+c}. \quad (49)$$

Zde σ_f' , ε_f' jsou součinitelé únavové tažnosti a únavové pevnosti, a b , c jsou exponenty únavové pevnosti a tažnosti.

- Kritérium podle Bergmanna

[22]

Bergmannovo kritérium je modifikací SWT kritéria s možností zlepšení korelace s experimentálními výsledky.

$$\sigma_{a,eq} = \sqrt{(\sigma_a + k_b \cdot \sigma_m) \cdot \sigma_a} = \sqrt{(\sigma_a + k_b \cdot \sigma_m) \cdot E \cdot \varepsilon_a} \quad (50)$$

$$\sigma_{max} \cdot \varepsilon_a = \frac{\sigma_f'^2}{E} \cdot (2N)^{2b} + \sigma_f' \cdot \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^{b+c}. \quad (51)$$

Parametr k_b představuje Bergmannův koeficient, který se určuje experimentálně (je v rozsahu 0.4 – 0.7)

- Kritérium podle Erdogan & Robertse

[23]

Podobnou modifikaci SWT kritéria zavádí i kritérium podle Erdogan & Robertse. Výsledky této metody jsou podobné jako u Bergmanna.

$$\sigma_{a,eq} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)^{1-\gamma} \cdot \sigma_a^{1+\gamma}} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)^{1-\gamma} \cdot \sigma_a^\gamma \cdot E \cdot \varepsilon_a} \quad (52)$$

$$\sigma_{a,eq} = \sigma_f'^2 \cdot (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \cdot E \cdot \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^{b+c} \quad (53)$$

Parametr γ je Erdogan & Robertsův koeficient

- Kritérium podle Socie

[24]

Tato metoda patří mezi kritéria vycházející z kritické roviny, které odhadují únavovou životnost pomocí parametrů, které mají rozhodující vliv na šíření trhliny v rovinách zatížených smykem:

$$g_a \cdot \left(1 + k_1 \cdot \frac{N_{max}}{\sigma_y}\right) = \frac{\tau'_f}{G} \cdot (2N_f)^b + \gamma'_f \cdot (2N_f)^c, \quad (54)$$

nebo tahem:

$$N_{max} \cdot e_a = \frac{\sigma'_f{}^2}{E} \cdot (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \cdot \varepsilon'_f \cdot (2N_f)^{b+c} \quad (55)$$

- N_{max} maximální normálové napětí na kritické rovině během cyklu
 g_a amplituda smykové deformace na kritické rovině během cyklu
 e_a amplituda normálové deformace na kritické rovině během cyklu
 k_1 Socieho koeficient
 G modul pružnosti ve smyku
 τ'_f koeficient únavové pevnosti ve smyku
 γ'_f koeficient tažnosti ve smyku
 b exponent únavové pevnosti
 c exponent únavové tažnosti

- Kritérium podle Heitmanna

[25]

$$Z_d = \frac{2.9}{2E} \Delta\sigma_{eq}^2 + \frac{2.5}{1+n'} \Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon_p \quad (56)$$

$$\Delta\sigma_{eq} = \frac{3.72}{(3-R)^{1.7}} \quad (57)$$

$$Z_d = \sigma'_f \cdot N^b \cdot \left[0.64467 \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2N_f)^b + \frac{10}{1+n'} \cdot \varepsilon'_f \cdot (2N_f)^c\right] \quad (58)$$

Tato metoda je založená na celkové deformační energii a také zahrnuje dopad potenciální energie.

- Kritérium podle Morrova

Metoda vyjadřuje únavový parametr jako plochu hysterezní smyčky. Rovnici životnosti odvodíme jako celkovou energii disipovanou po určitém počtu cyklů.

$$\frac{1-n'}{1+n'} \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_{a,p} = \frac{1-\frac{b}{c}}{1+\frac{b}{c}} \sigma_f' \cdot \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^{b+c} \quad (59)$$

- Kritérium podle Feltnera

Feltner stejně jako Morrow vyjadřuje únavový parametr jako plochu hysterezní smyčky. K vyjádření ale využije pouze její polovinu (tahová část smyčky).

$$\frac{2}{\frac{b}{c}+1} \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_{a,p} + \frac{\sigma_a^2}{2} = \sigma_f' \cdot (2N_f)^b \cdot \left[\frac{2}{\frac{b}{c}+1} \cdot \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^c + \frac{\sigma_f'}{E} \cdot (2N_f)^b \right] \quad (60)$$

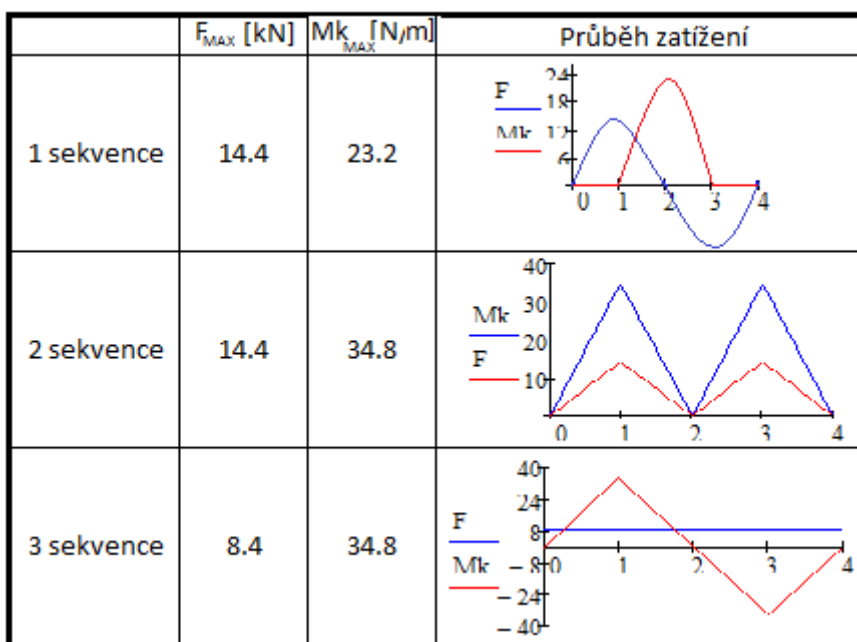
Nevýhodou Feltnerovy i Morrow metody je, že nepostihuje korekci na střední napětí hysterezní smyčky. Tento nedostatek lze ale odstranit dosazením korigované ekvivalentní amplitudy napětí.

4. Výpočet v PragTicu

Pro názornější použití programu PragTic bude předveden postup při výpočtu životnosti v oblasti nízkocyklové i ve vysokocyklové oblasti. Při importu celého konečnoprvkového modelu lze použít dva přístupy. Import pomocí *.pti souboru bude ukázán na výpočtu životnosti zkušební tělesa a import přes *.lis soubory na tažném zařízení. Dalším způsobem importu je import pomocí izolovaných bodů. Izolované body jsou body ukotvené v prostoru, bez jakékoliv vazby na konečnoprvkový model. Kromě definice bodu, je třeba definovat i normálu k tomuto bodu, který leží na určitém povrchu. Možnost použití izolovaných bodů lze například, když se vychází u únavové analýzy z analytického řešení nebo experimentu (tenzometrická měření).

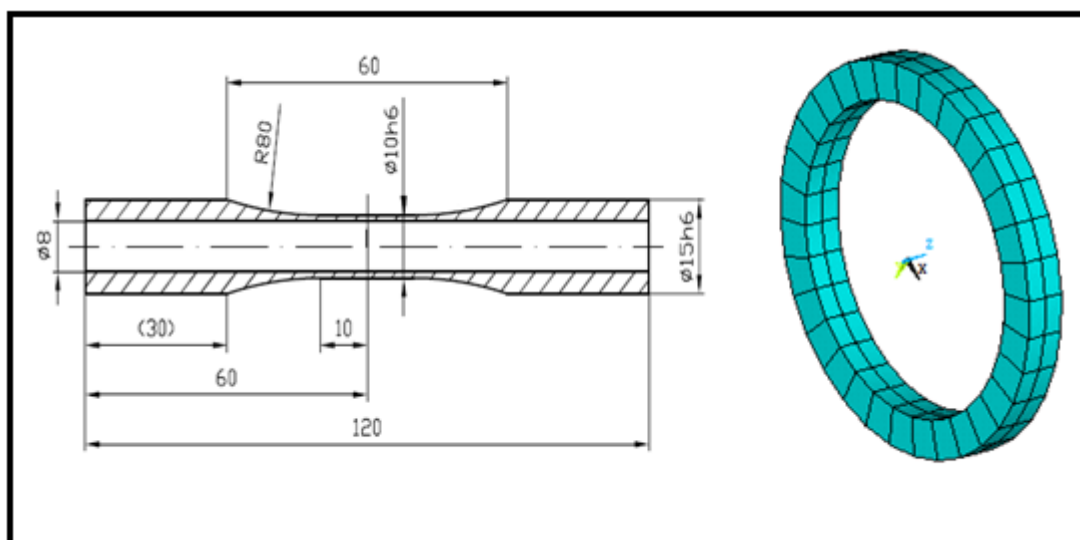
4.1. Výpočet v oblasti nízkocyklové únavy

Bude provedena simulace silově řízené únavové zkoušky, realizovaná na vzorku vyrobeného z materiálu věnce železničního kola. Zkušební těleso bylo namáháno tahem a krutem a postupně zatíženo třemi sekvencemi. Počet cyklů v první sekvenci je 250, v druhé 500 a cílem bude určit predikci počtů cyklů do iniciace trhliny v třetí sekvenci, viz obr. 11.



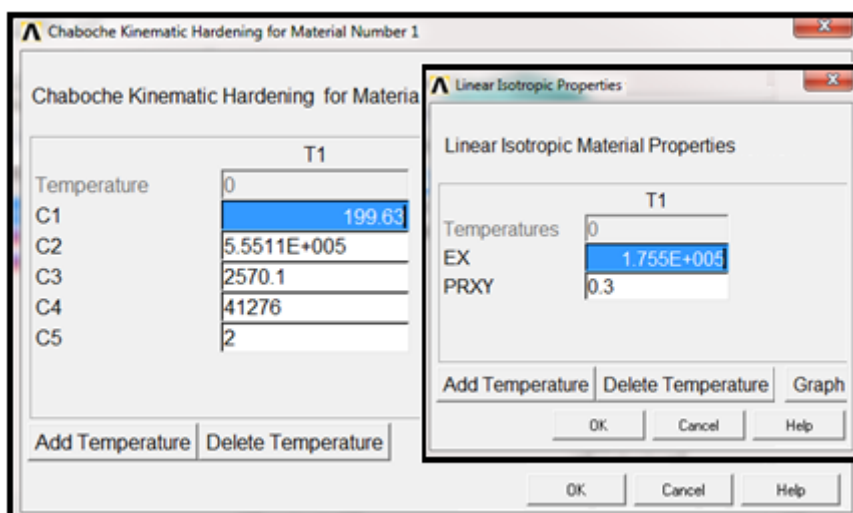
Obr. 11 Zatěžovací sekvence

V programu Ansys byl vytvořen model zkušební části vzorku. Délka zkušební části je 20mm, avšak pro tento případ postačí, když se použije délka 1 mm. Vnější průměr je 10mm a vnitřní průměr je 8mm. Použit byl kvadratický prvek SOLID186. Vytvořeno bylo 64 elementů uvedených na obr. 12.



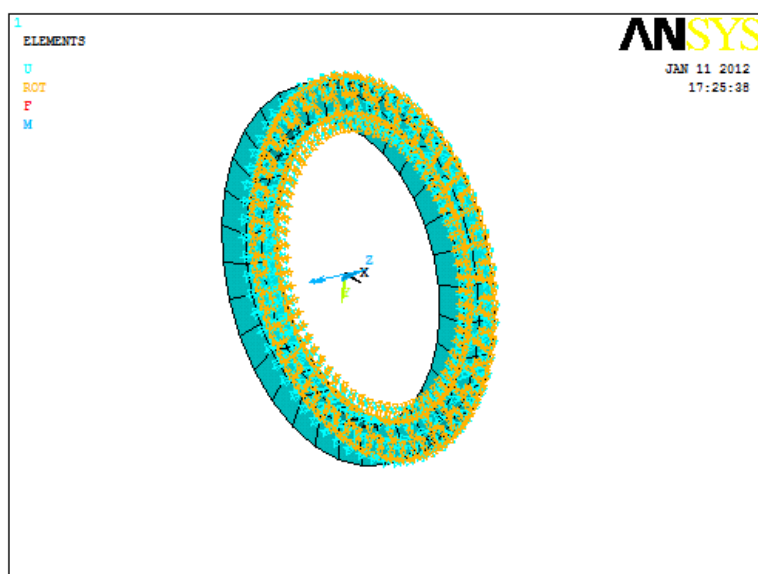
Obr. 12 Zkušební vzorek a konečnoprvkový model

Byl uvažován Chabocheův kinematický model zpevnění. Materiálové parametry byly vypočteny v programu MathCad. Zadání v Ansysu je zřejmé z obr. 13. V příloze č.3 je uveden celý výpočet z MathCadu.



Obr. 13 Zadané materiálové parametry

Při zadávání okrajových podmínek, bylo na jednom konci uvažováno vetknutí. V místě byly odebrány posuvy i rotace kolem os x a y.



Obr. 14 Okrajové podmínky

Pro druhou a třetí sekvenci bylo zatížení tahovou silou a kroutícím momentem aplikováno pomocí tabulky. První sekvence je složitějšího průběhu, proto bylo potřeba zadat sílu i kroutící moment pomocí funkce (obr. 15).

1. SEKVENCE	2. SEKVENCE				3. SEKVENCE			
F	F		Mk		F		Mk	
Equation	0	0	0	0	0	-8482	0	0
Result = $Fa \cdot \sin(\{PI\} \cdot \{TIME\} / 2)$	1	14400	1	34800	1	-8482	1	34800
Mk	2	0	2	0	2	-8482	2	0
Equation	3	14400	3	34800	3	-8482	3	-34800
Result = $(Mka \cdot \sin(\{PI\} \cdot \{TIME\} / 2 + 3 \cdot \{PI\} / 2) + \text{abs}(Mka \cdot \sin(\{PI\} \cdot \{TIME\} / 2 + 3 \cdot \{PI\} / 2))) / 2$	4	0	4	0	4	-8482	4	0

Obr. 15 Zadání tahové síly a krouticího momentu

Pro import metodou pomocí *.pti souboru je nutno nastavit jak operační systém, tak Ansys.

- Nastavení Ansysu

Je potřeba implementovat APDL skripty do programu Ansys. APDL skripty jsou uloženy ve standardním adresáři (C:\ANSYS Inc\v130\ansys\apdl\). Celý import probíhá pomocí dvou APDL skriptů a jednoho skriptu vytvořeného v programovacím jazyku Python.

Soubory pro generování výstupů z ANSYSClassic:

ansys2pragtic.mac

ansys2pragtic.py

Soubory pro načítání výsledků z programu PragTic:

pragtic2anasys.mac

getfile.tcl

Jako poslední je nutné tyto skripty (ansys2pragtic.mac a pragtic2anasys.mac) zahrnout do prostředí Ansys v „Ansys Toolbar“ a vytvořit dvě tlačítka na export a import. Před samotným spuštěním importu je potřeba ještě aktualizovat soubor “ansys2pragtic.mac“ (nastavit cestu k souboru “ansys2pragtic.py“) a soubor “pragtic2anasys.mac“ (nastavit cestu, kde jsou uložena makra).

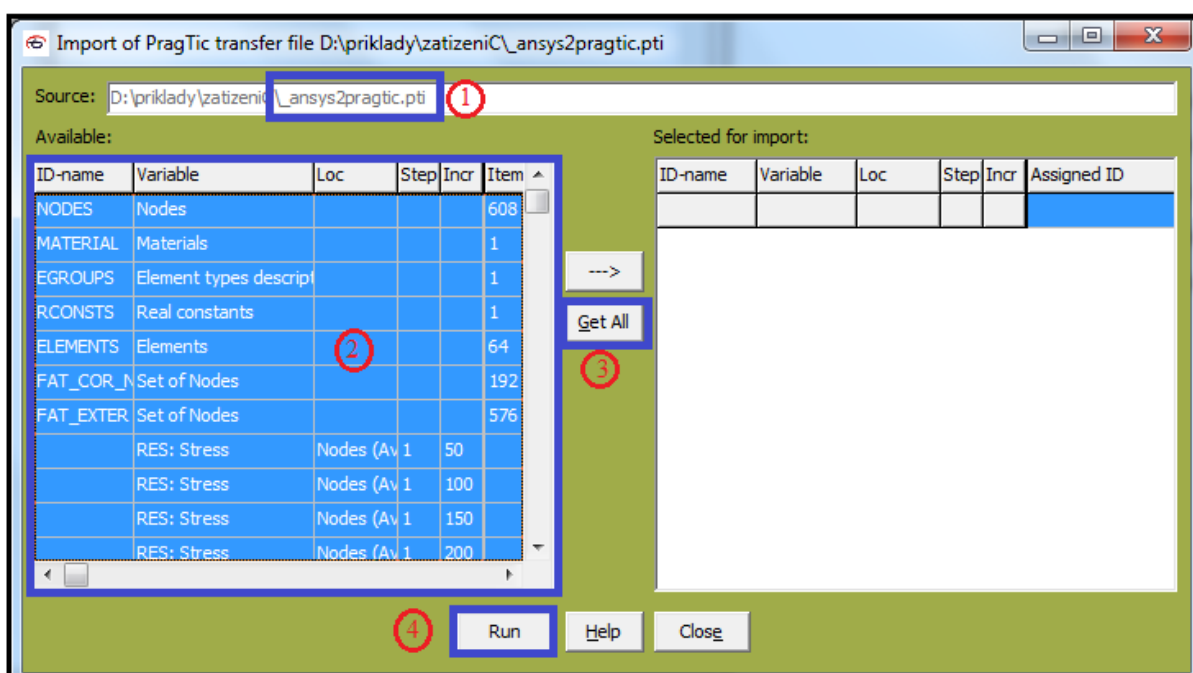
- Nastavení Windows

Ve Windows je pak důležité nastavit dvě systémové a jednu uživatelskou proměnnou operačního systému Windows7.

Uživatelské proměnné:	
Proměnná	Hodnota
python	C:\ANSYS Incl\130\aisol\CommonFiles\Utilities\CPython\Win64\python
Systémové proměnné:	
Proměnná	Hodnota
Python	C:\ANSYS Incl\130\aisol\CommonFiles\Utilities\CPython\Win64\python
Path	..., C:\ANSYS Incl\130\aisol\CommonFiles\Utilities\CPython\Win64\python

Obr. 16 Nastavení proměnných

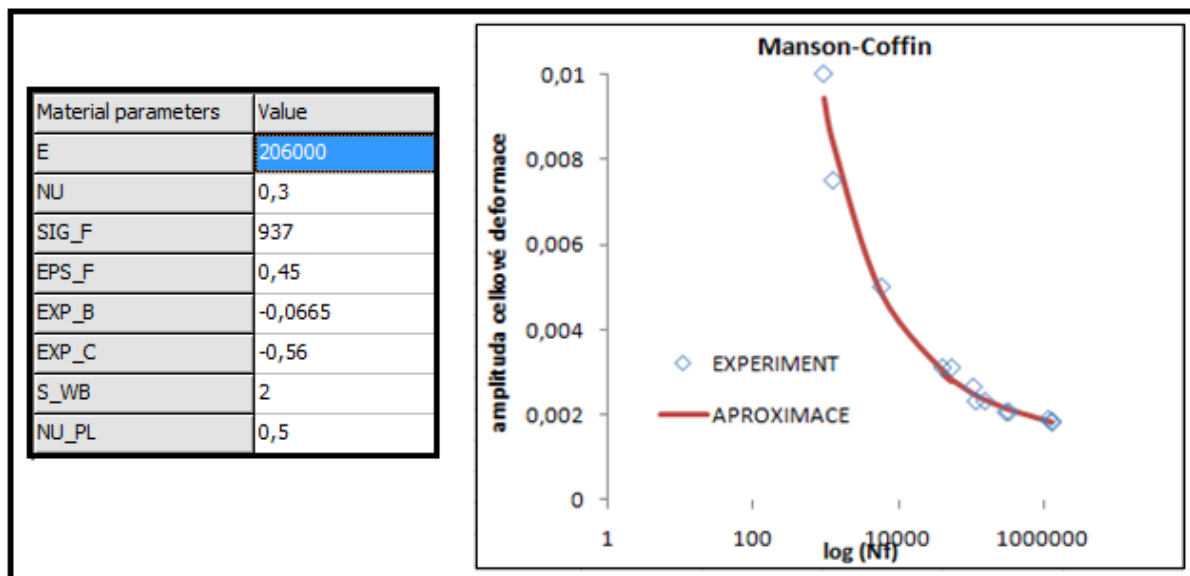
Vytvořeným tlačítkem „Ansys2pragtic“ se spustí export. Výpočet bude u každé sekvence proveden pro jeden cyklus. Proto je zapotřebí definovat okamžiky pro export výsledků. Během exportu jsou do pracovního adresáře ukládány datové soubory, které jsou následně pomocí skriptu „ansys2pragti.py“ kondenzovány do výsledného datového souboru „ansys2pragtic.pti“, který se importuje do PragTicu. Postup importu je uveden na obr. 17.



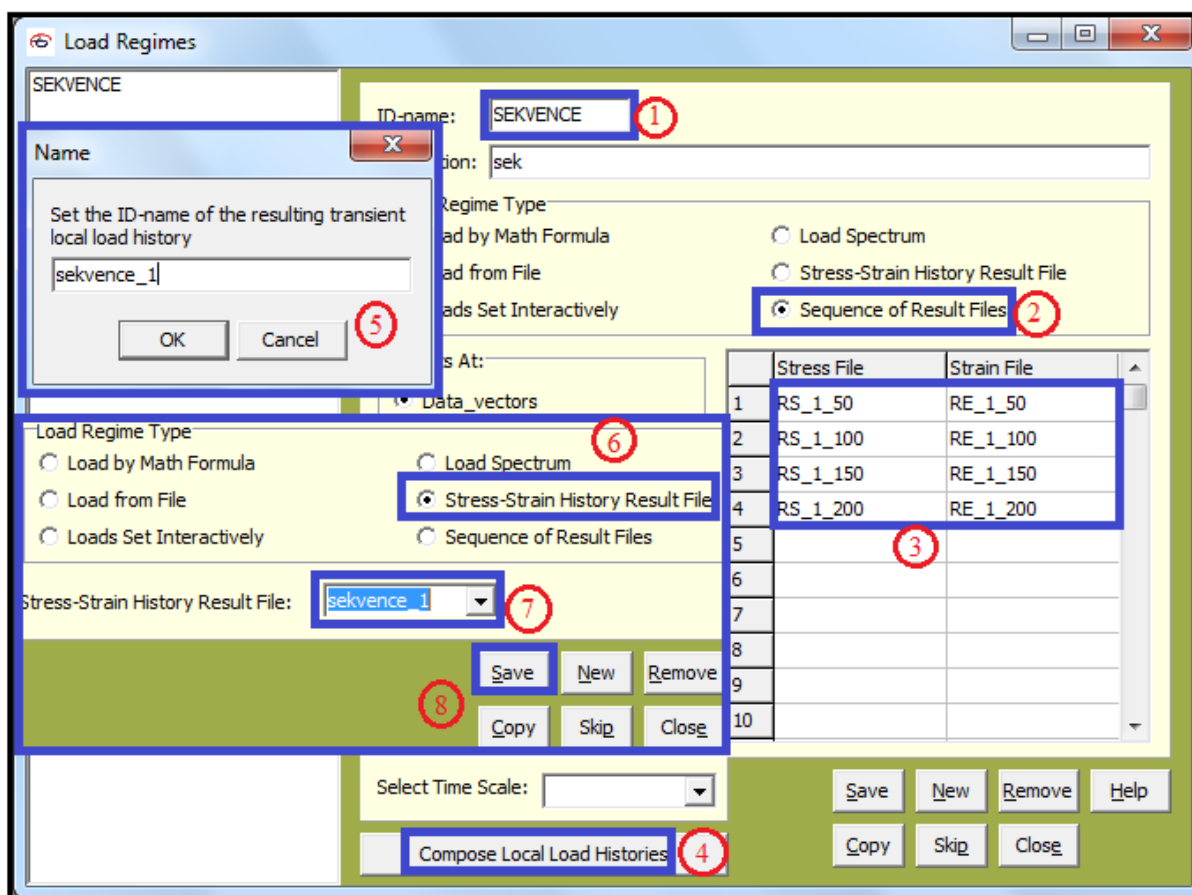
Obr. 17 Import dat

Tímto způsobem se načetly všechny potřebné informace o uzlech, elementech a výsledcích. Potřeba je ještě nastavit únavové parametry, zátěžný režim zatěžování a výpočetní

metodu. Výpočet byl proveden pro jeden cyklus. Uvažovány byly čtyři časové okamžiky pro uzavření cyklu.



Obr. 18 Únavové parametry



Obr. 19 Nastavení zátěžného režimu

Pro výpočet bylo zvoleno kritérium nízkocyklové únavy „Wang-Brown 93“ a výpočet byl spuštěn na všechny načtené uzly. Tento postup je potřeba opakovat pro zbylé dvě zatěžovací sekvence. Největší poškození vyšlo u uzlu 567.

Kritérium	Wang - Brown		
Zatížení	1. sekvence	2. sekvence	3. sekvence
Míra poškození	0.000270884569	0.00003957135143	0.0004797798612

Tab. 2 Míra poškození u uzlu 567

Pro výpočet počtu cyklů do lomu využijeme hypotézu lineární kumulace poškození, lze tedy vyjít ze vzorce:

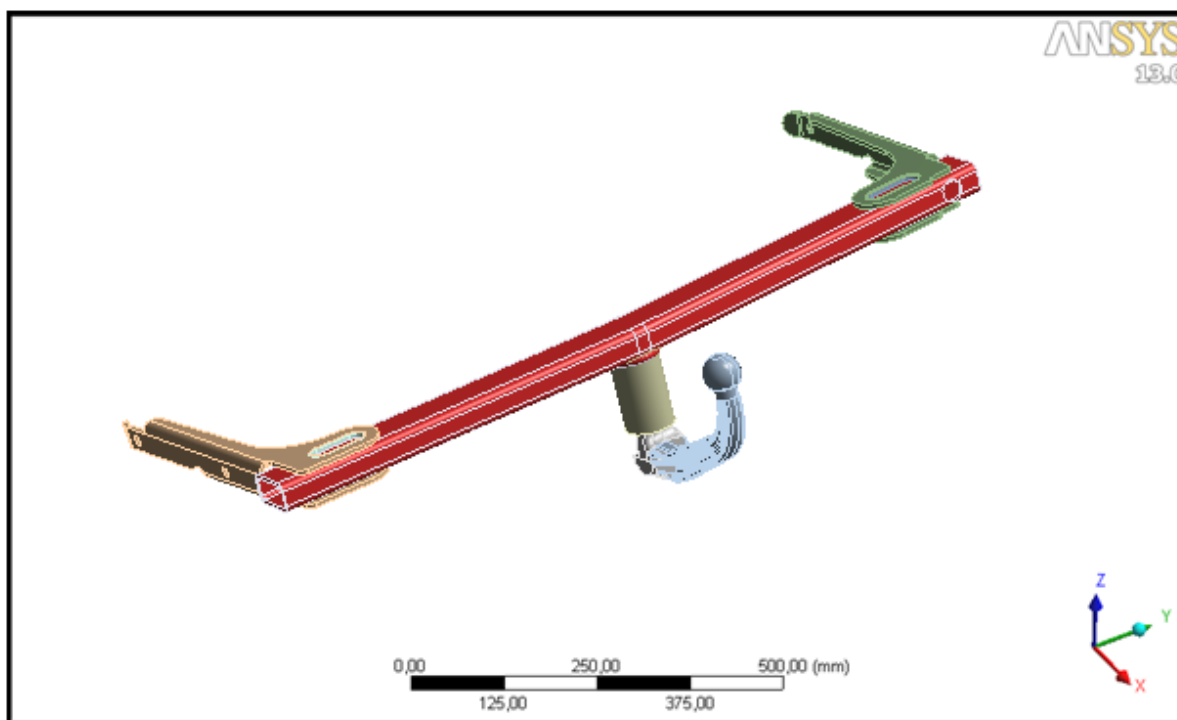
$$N = \frac{1 - (N_1 \cdot D_1 + N_2 \cdot D_2)}{D_3}, \quad (61)$$

kde při dosazení všech proměnných vyjde, že u zkušebního zařízení dojde k porušení při třetí sekvenci u 1781 cyklu. Výsledek bude okomentován v závěru.

4.2. Výpočet v oblasti vysokocyklové únavy

4.2.1. Příprava v Ansysu

Bude provedena simulace zkoušky, která proběhla v podmínkách Škoda-Auto. Modelem je tažné zařízení osobního vozu. Cílem této zkoušky je, testování zda-li vydrží zadní rám (označen červeně) zatěžování dle metodiky CARLOS TC.



Obr. 20 Model tažného zařízení

Model byl importován do Ansysu pomocí převodového formátu STEP. Tažné zařízení je zkoušeno v tuhých upevňovacích přípravcích a postupně zatěžováno třemi zátěžnými moduly, jenž byly vytvořeny pomocí programu RPCPro. Každý modul představuje určitý styl jízdy, trvá různou dobu a liší si i počtem opakování. Celá tato zkouška trvá dohromady 92 hodin. Modul 1 (M1) je dlouhý 630 sekund a je složen z 500 opakování, modul 2 (M2) trvá 271 sekund a počet opakování je 50, doba modulu 3 (M3) je 51 sekund a počet opakování je 10. Pravidlo opakování je tedy:

$$10 \cdot (5 \cdot (10 \cdot M1 + M2) + M3) \quad (62)$$

Tato zkouška využívá standardizovaných zatížení v čase pro všechny tři směry, které musí být zmenšeny na dané vozidlo s přívěsem. Používá se tedy vztažná hodnota D , která se přepočítá pro každý automobil zvlášť. Hodnota D je definována jako:

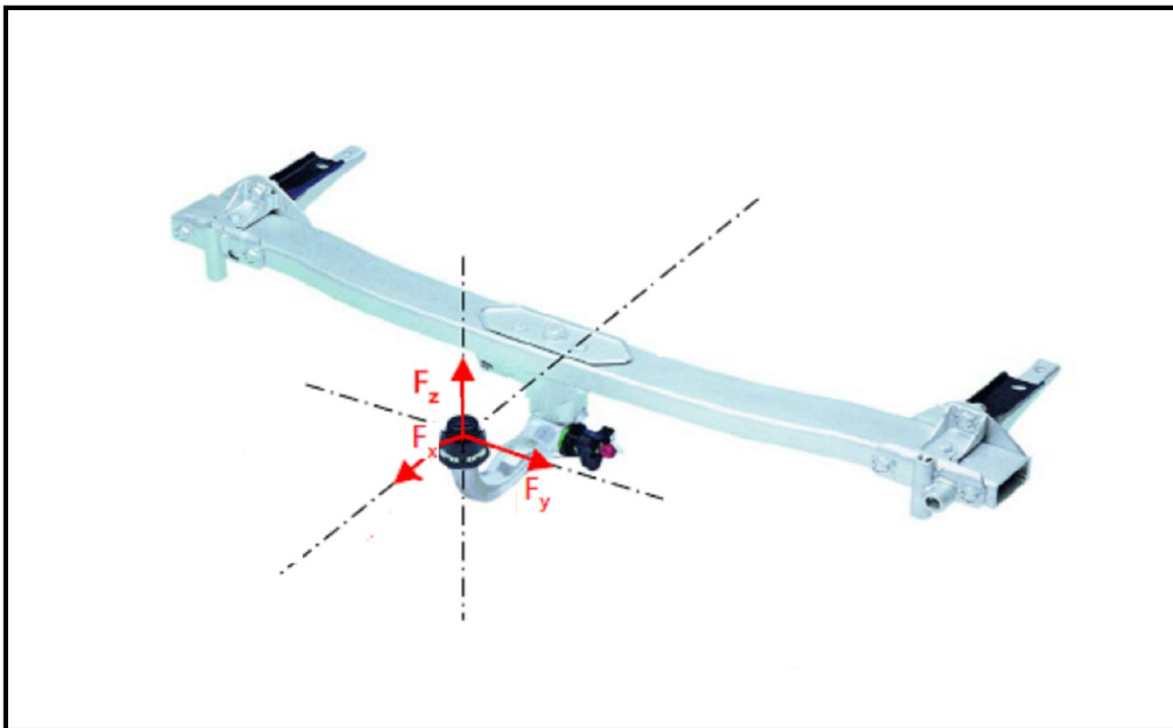
$$D = \frac{m_{Fzg} \cdot m_{Hänger}}{m_{Fzg} + m_{Hänger}} \cdot g. \quad (63)$$

D	přepočítaná vztažná hodnota [kN]
m_{Fzg}	hmotnost vozidla [Kg]
$m_{Hänger}$	hmotnost závěsu [Kg]
g	tíhové zrychlení [m/s^2]

Je-li zkoušený vzorek, tedy v našem případě tažné zařízení zkoušeno v upevňovacích přípravcích, dle metodiky CARLOS TC, je nutno hodnotu D navýšit o 15%.

Zadaná vztažná hodnota $D = 10,3 \text{ kN}$

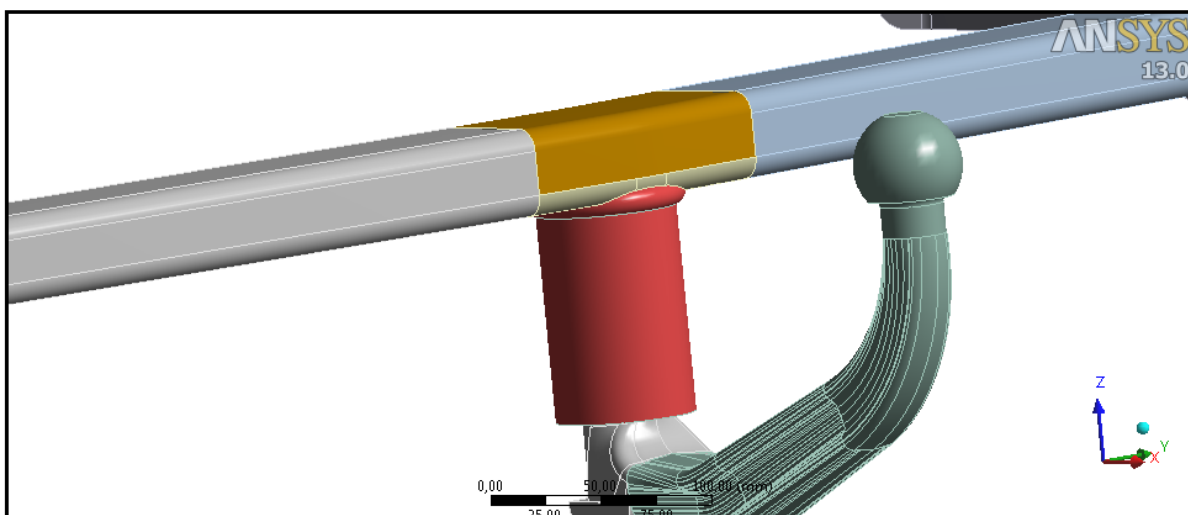
Přepočítaná hodnota $D = 11,85 \text{ kN}$



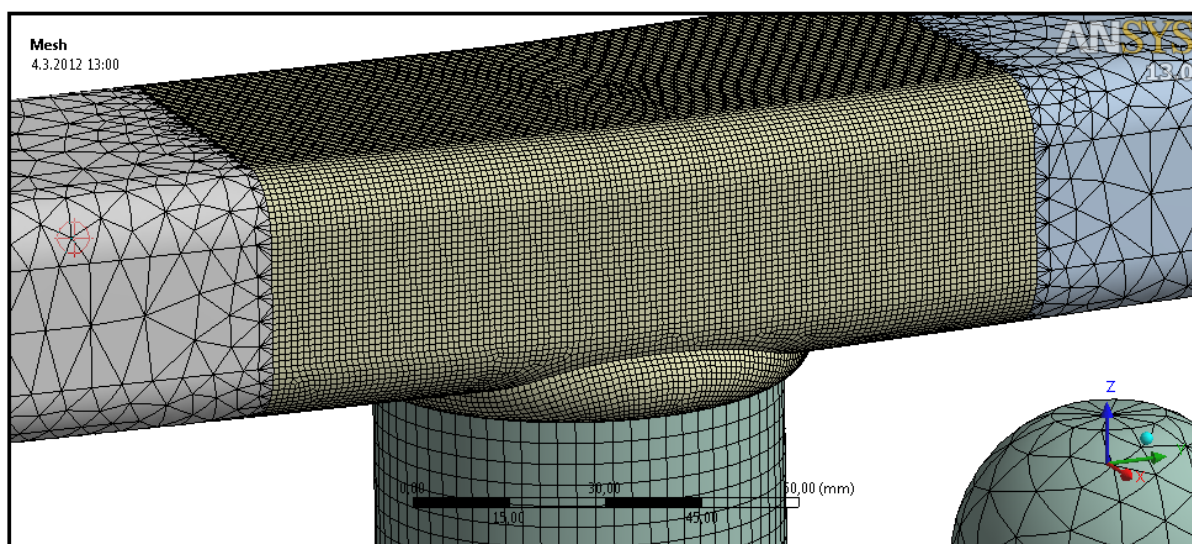
Obr. 21 Směry zatížení

- Vytvoření sítě konečných prvků

S počtem elementů a kvalitou sítě souvisí přesnost výsledků a doba počítání. Nejdříve byl model tažného zařízení počítán s hrubší sítí, která měla menší časové nároky na výpočet. Bylo vytipováno místo s nejvyšší koncentrací napětí, které se nachází na spodní části rámu v okolí svaru. Toto místo je důležité upravit. Aby se při zjemňování sítě nevytvořilo zbytečně mnoho elementů, byl dlouhý svařenec rozdělen dvěma řezy. Dále model tažného zařízení obsahoval mnoho malých ostrých plošek v místě s nejvyšší koncentrací napětí, které při tvorbě sítě produkovaly nekvalitní elementy, proto byl model upraven pomocí funkce virtuální topologie, pomocí níž se podařilo spojit malé plošky v jednu velkou. Tato funkce nebyla spuštěna automaticky na všechny plochy, ale pouze na vybrané plochy. Takto vybrané plochy jsou poté chápány při tvorbě sítě jako jediná spojená plocha.



Obr. 22 Úprava modelu



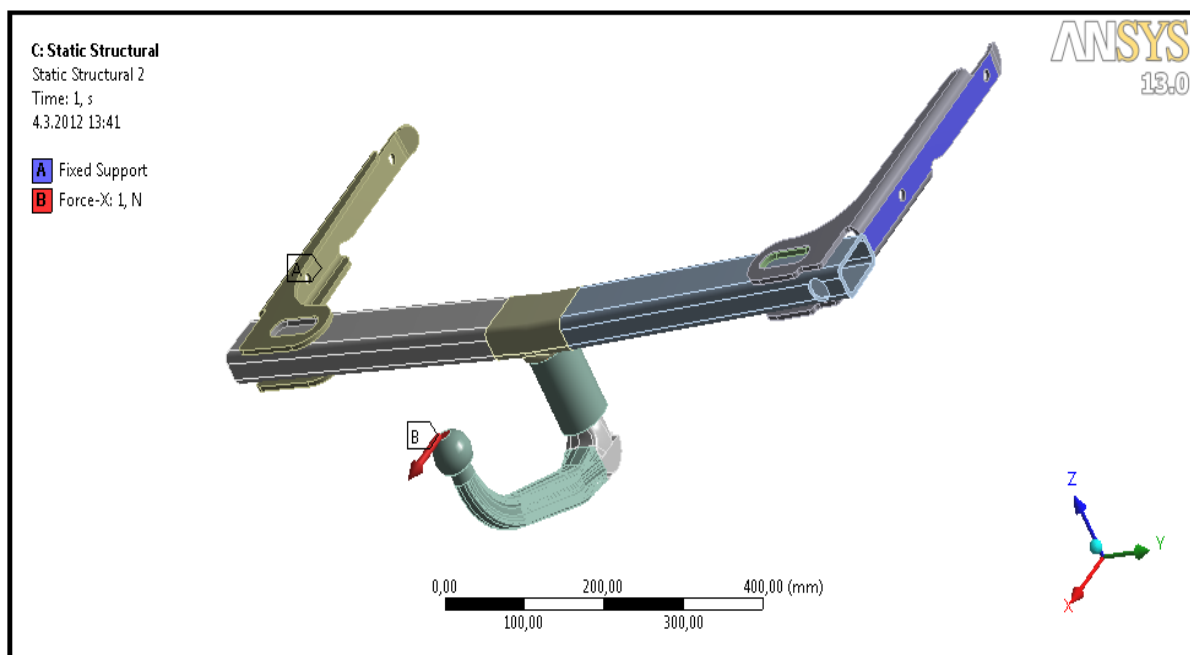
Obr. 23 Síť tažného zařízení

Velikost elementu v kritickém místě je 1 mm a byla použita metoda „Hex Dominant Method“, velikost elementů v ostatních místech je 5 mm. Celý model obsahuje dohromady 261417 elementů a 843687 uzlů.

- Zadání okrajových podmínek

Model tažného zařízení je nezbytné uložit a zatížit tak, aby co nejvíce odpovídal zkoušenému modelu. Model tažného zařízení je uchycen v tuhých upevňovacích přípravcích, proto jako okrajová podmínka byla použita podmínka „Fixed Support“ a byla aplikována na krajní plochy tažného zařízení. Zatěžovací síla působí na hák tažného zařízení a to ve všech třech směrech. Provedeme tedy statický výpočet pro jednotkové zatížení, pro každou sílu v jednotlivém směru zvlášť. Výsledkem jsou pak tři statické výpočty pro jednotlivé síly (F_x ,

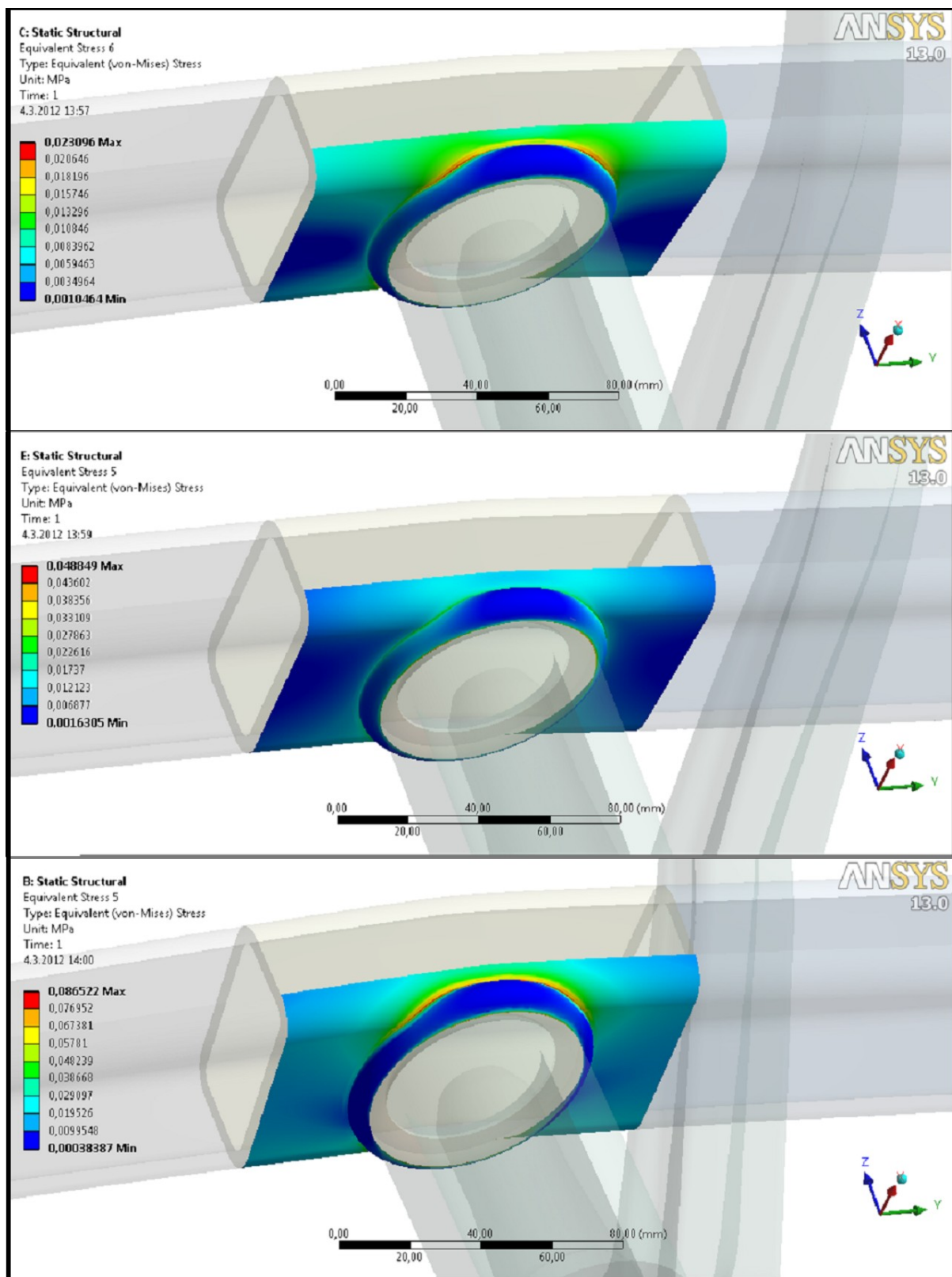
Fy, Fz). Při těchto výpočtech se zatím nebude uvažovat svislé statické zatížení, působící na kouli tažného zařízení. Do výpočtu se připočte následně až v programu PragTic. Na obr. 24 je vidět zadanou okrajovou podmínku pro sílu Fx.



Obr. 24 Okrajové podmínky

- Ekvivalentní napětí pro jednotlivé směry zatížení

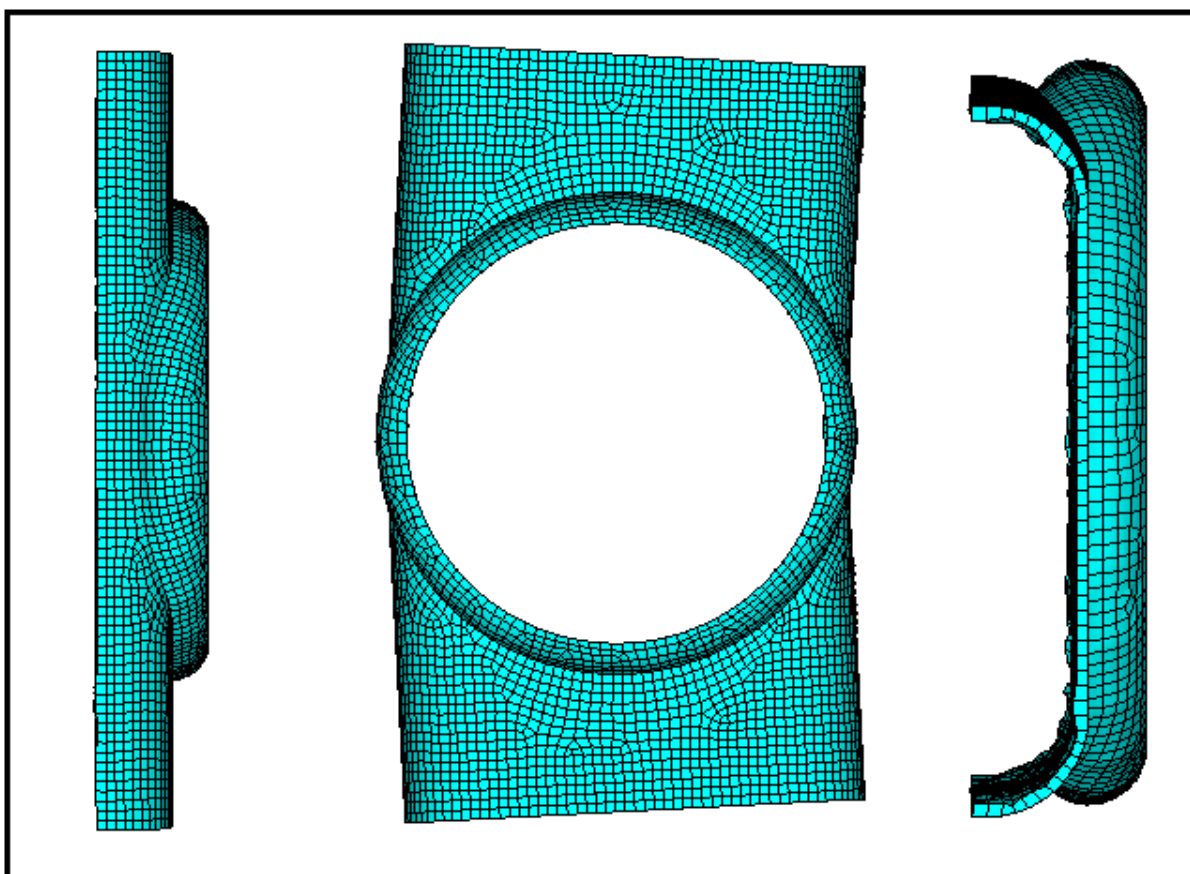
Na obr. 25 je vidět ekvivalentní napětí pro jednotlivé směry zatížení (Fx, Fy, Fz). Nejvyšší hodnota napětí dosahuje 0,08 MPa a to při zatížení silou Fz.



Obr. 25 Hodnoty ekvivalentního napětí ve všech směrech

4.2.2. Import dat do programu PragTic

Import bude proveden pomocí *.lis souboru. Je potřeba připravit soubory s informacemi o uzlech, elementech a soubory s výsledky. Pro export dat z Ansys Workbench bylo použito makro (příloha č. 1), díky kterému se vygenerovaly všechny potřebné soubory. Do PragTicu se postupně načtou definice uzlů, elementů a jako poslední výsledkové soubory. Importována byla pouze část modelu (viz obr. 26)

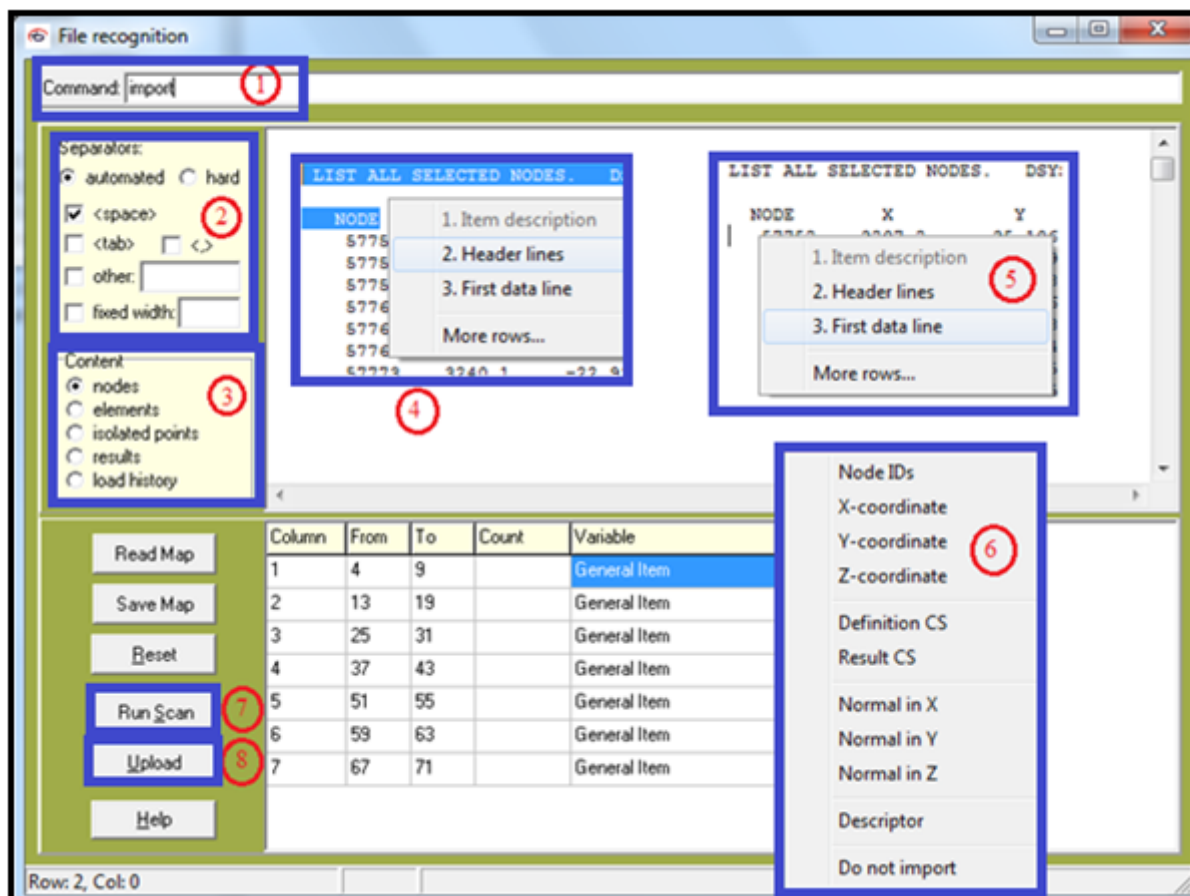


Obr. 26 Importovaná část do PragTicu

- Import uzlů

Elementy jsou na uzlech závislé, proto je nutné jako první načíst uzly. V případě, že se do PragTicu načtou elementy a k nim nejsou žádné příslušné uzly, PragTic je imaginárně vytvoří. Při importu uzlů postupujeme podle obr. 26. Příkazem „import“ v příkazovém řádku se načte soubor NLIST.lis. Separátor bude oddělen mezerou a při importování uzlů, lze nastavit jak automatický, tak pevný (hard). Při nastavení pevného separátoru je zapotřebí oddělit jednotlivé sloupce od sebe, kdežto v automatickém módu to PragTic udělá sám. V obsahu je zapotřebí zatrhnout „nodes“. Dalším bodem je nastavení hlavičky. Do hlavičky patří vše, co se nachází nad čísly uzlů. Pokud se stane, že při načítání jednotlivých řádků se objeví některý

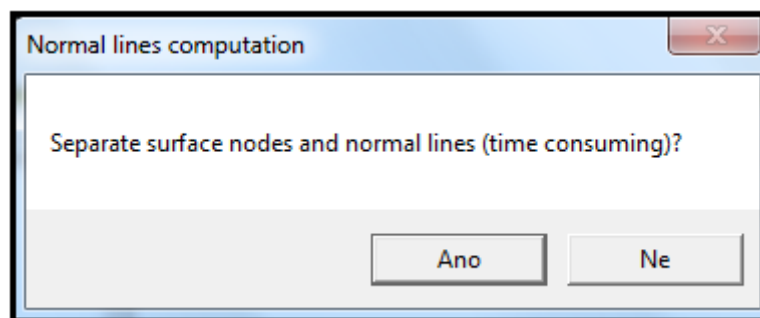
řádek z hlavičky, PragTic je automaticky přeskočí a pokračuje dále. Dále je potřeba stanovit první řádek, od kterého bude PragTic načítat do své databáze data. Hned poté vyskočí tabulka (viz. bod 6), kde je potřeba definovat proměnné. Příkazem „Save Map“ lze tuto mapu uložit a použít při pozdějším načítání uzlů, čímž odpadne další nastavování mapy. Jako poslední se spustí skenování „Run Scan“ a poté příkazem „Upload“ se data nahrají do PragTicu.



Obr. 27 Mapa uzlů

- Import elementů

Při načítání elementů je průběh podobný jako u uzlů. Separátor lze opět nastavit oběma způsoby. V obsahu je nutno zatrhnout že se jedná o uzly. Při uploadu, je potřeba definovat typ elementů, které PragTic podporuje (viz tab. 1) a poté vyskočí okno, pomocí kterého lze vytvořit sadu povrchových uzlů. Tato sada nese název N_NRM.



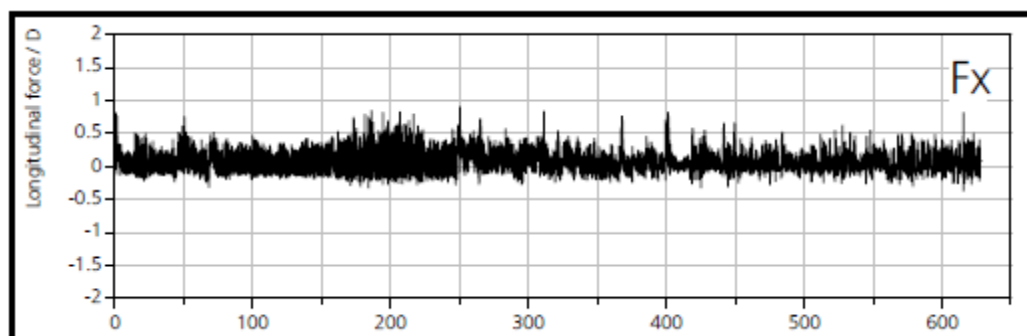
Obr. 28 Vytvoření sady uzlů, které jsou na povrchu

- Import výsledků

Průběh načítání výsledku je totožný jak u načítání uzlů nebo elementů. Je nutno zatrhnout v obsahu, že se jedná o výsledky (results). Separátor lze nastavit jak automatický, tak pevný. Pokud je součást namáhána více způsoby, je nutné každý zátěžný cyklus načíst zvlášť.

- Import historie zatěžování

K dispozici jsou 3 soubory jednotlivých modulů, které vzešly z tříosého zatěžování dle metodiky CARLOS TC. Postupně se načtou jednotlivé soubory do PragTicu. Na obr. 29 je pro ukázkou znázorněn způsob zatěžování prvního modulu pro osu x. Celá zátěžná historie je zobrazena v příloze č. 2.



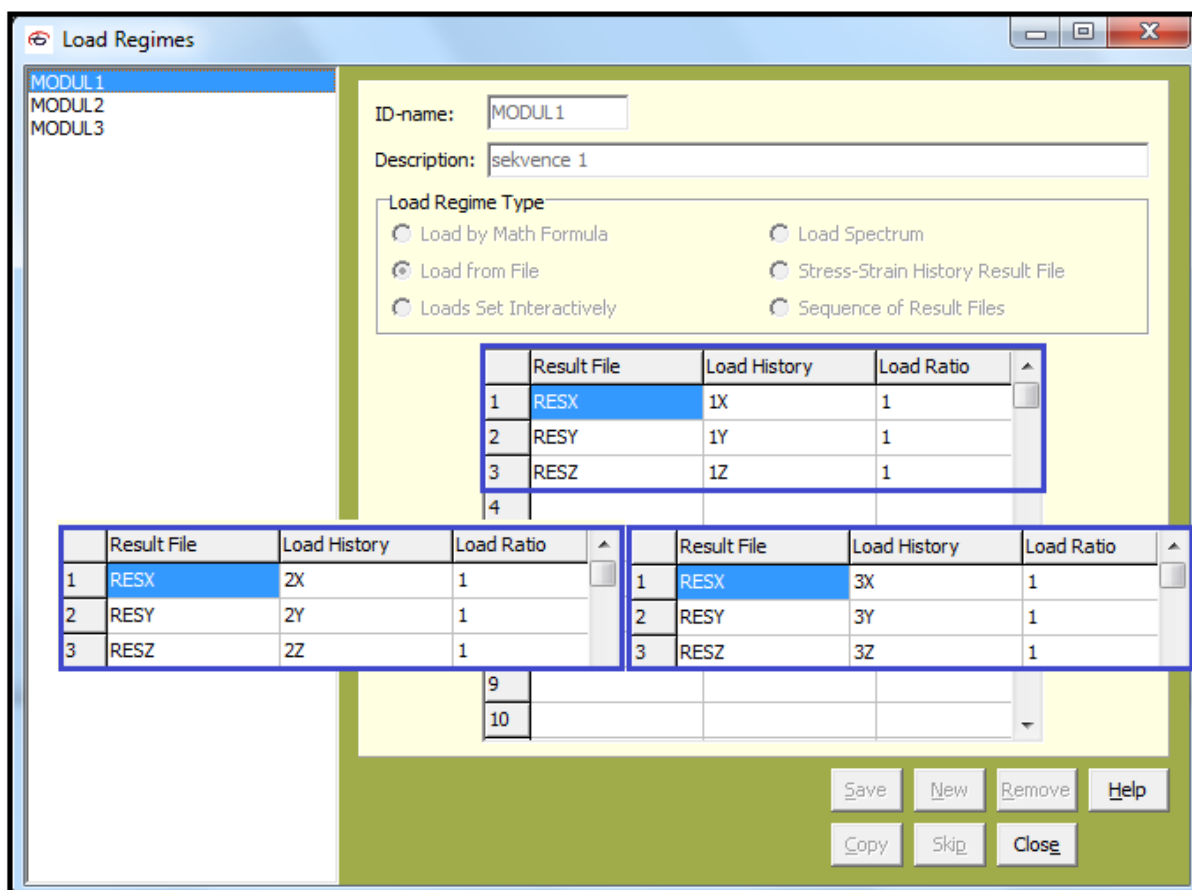
Obr. 29 Zátěžná historie modulu 1 pro osu x

Při importu zátěžné historie nelze importovat celý modul, ale musí se postupně načíst zatížení pro jednotlivé síly. Výsledkem bude devět načtených souborů, které je před použitím důležité upravit. Z předchozích obrázků je patrné, že načtená data jsou poměrem zatěžovací síly pro jednotlivý směr a vztažnou hodnotou. V PragTicu je nutno data roznásobit. Na tažné zařízení působí svislé statické zatížení o hodnotě 80kg. Tato hodnota se přepočte na sílu a přičte k hodnotě zátěžné síly ve směru Z pro všechny tři moduly. Tyto úpravy lze provést pomocí příkazu Tools → Array → Superpose.

4.2.3. Výpočet v PragTicu

- Nastavení zátěžného režimu

Zátěžný režim je potřeba nastavit pro každý modul zvlášť. V každém modulu jsou obsaženy výsledkové soubory pro jednotlivé směry zatížení a historie zatížení. Load Ratio rovnající se 1 naznačuje, že se jedná o výpočet, který byl proveden pro jednotkové zatížení.

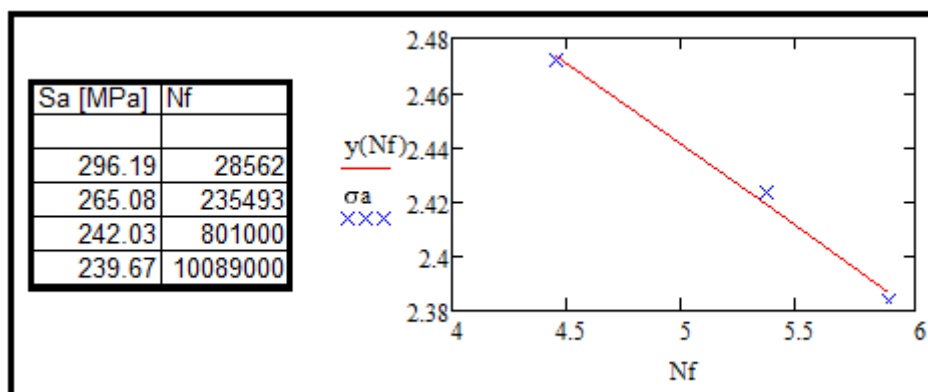


Obr. 30 Nastavení zátěžného režimu

- Výpočet materiálových dat a nastavení metody výpočtu

Tažné zařízení je z materiálu S355. Tento materiál je široce používán v Německu. Jelikož ale materiálová data pro tento materiál nebyla k dispozici, jeví se jako adekvátní použití českého ekvivalentu 11523. Jako metoda výpočtu byla zvolena LESA metoda. Při počítání materiálových konstant potřebných pro LESA metodu je důležité připomenout, že Wöhlerova křivka v PragTicu je chápána v zápisu $\sigma^{Wf-1} \cdot N = konst.$ a nikoliv v Basquinově formě.

Z experimentálních dat pro střídavý tah/tlak byla stanovena materiálová data potřebná pro výpočet. Tato a další materiálová data lze najít v této publikaci [26], kde bylo testováno Fuxovo kritérium. Koeficient W_{f-1} byl stanoven lineární metodou nejmenších čtverců (příloha č. 4). Pro jeho výpočet byl využit program MathCad a výpis je uveden v příloze. Mez pevnosti $TENS_{-1}$ byla přejata z experimentální zkoušky. NF_{f-1} byl stanoven odhadem z průběhu lineární regrese.



Obr. 31 Lineární regrese dat

Calculation Methods - View

LESAs

ID-name: LESAs

Description: lesas

Method: LESAs - not finished yet

Material: 18

Decomposition: Rain-flow with von Mises (signed I1) reduction

Elasto-plasticity: No

Mean stress influence: Goodman

Influence of stress gradient: No

Influence of technology: No

Influence of surface quality: No

Influence of size: No

Influence of temperature: No

Set another survive probability: No

Cumulative rule: No

Material parameters	Value
E	206000
NU	0,3
SIG_ULT	548,27
TENS-1	239,67
W_F-1	16,6
NF_F-1	1000000
N_MSE	2,5

Solution option	Parameter
Negative mean stress <0~zeroized, 1~used>	0
Only every x-th data-point taken from load history	1
Close non-closed cycles in second run <1~yes, 0~no>	1
Combination of infl. factors <0~FEMFAT. 1~Marin>	0

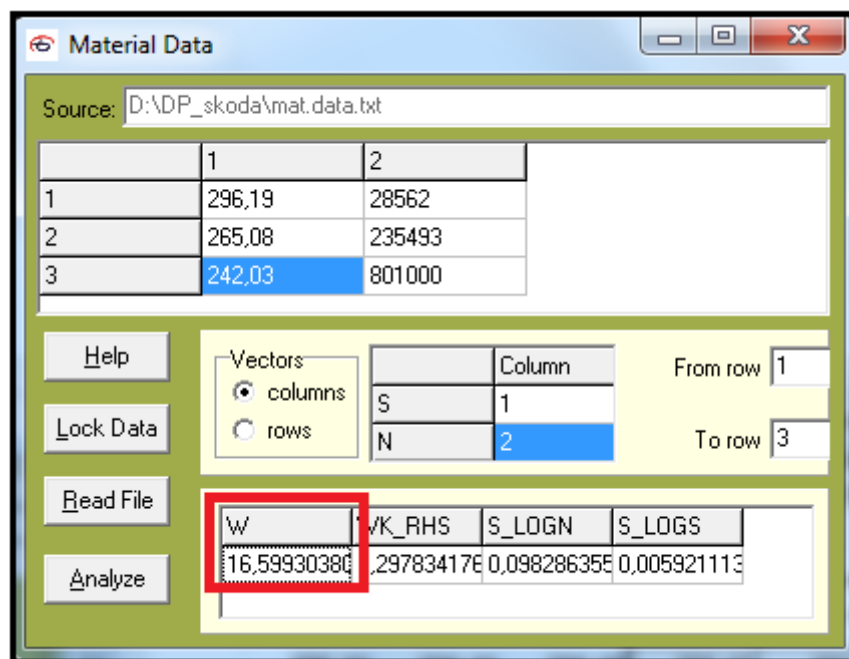
Solution variable	Value
Minimum damage	1E-20
Weight of non-closed half-cycles	0,5

Buttons: Help, Save, New, Remove, Skip, Copy, Close

E - Elastic modulus

Obr. 32 Početní metoda a materiálová data

Pomocí funkcí Tools → Material → S-N curve → Derive, lze v PragTicu ověřit správnost výpočtu koeficientu W_{f-1} (Obr. 33). Do tabulky se zadaly tři dvojice dat z experimentu Sa-Nf. Shodnost výsledků ukazuje, že pro stanovení uvedeného parametru je vhodné používat přímo PragTic.



Obr. 33 Kontrola exponentu W_{f-1}

- Výpočet poškození

Výpočet byl proveden na uzlech, které se nachází na povrchu součásti a postupně spuštěn na všechny tři zátěžné režimy. Pomocí filtrů byl identifikován kritický uzel a pro tento uzel byla spočítána životnost.

Obr. 34 Kritický uzel modulu3

Kritérium	LESA		
Zatížení	1. modul	2. modul	3. modul
Míra poškození	0.00033339119	0.00148414483	0.0370170521118

Tab. 3 Hodnoty poškození u jednotlivých modulů

Pro ilustraci lze vypočítat počet opakování každého modulu do iniciace trhliny za předpokladu, že budou působit samostatně

$$N_1 = \frac{1}{D_1} = \frac{1}{0.00033339119} = 2999.47938 \quad (64)$$

$$N_2 = \frac{1}{D_2} = \frac{1}{0.00148414483} = 673.7887 \quad (65)$$

$$N_3 = \frac{1}{D_3} = \frac{1}{0.0370170521118} = 27.0145 \quad (66)$$

Skutečný počet opakování v testu je u prvního modulu 500, u druhého modulu 50 a u třetího 10. Ze vztahů (64) až (66) je zřejmé, že nejvíce poškozující je třetí modul.

Pokud se vezme v potaz, že celé zatěžování je složeno z jedné zkoušky, celkové poškození poté bude

$$D = D_1 \cdot N_1 + D_2 \cdot N_2 + D_3 \cdot N_3 \quad (67)$$

$$D = 0.00033339119 \cdot 500 + 0.0014841448 \cdot 50 + 0.0370170521118 \cdot 10 = 0.61 \quad (68)$$

Míra poškození dosahuje hodnoty 0.61. Lze tedy říct, že k iniciaci trhliny u testu nedojde. V případě, že by zkouška byla opakována, by mohlo dojít k poškození ve třetím modulu.

5. Závěr

Diplomová práce je zaměřena na problematiku odhadu životnosti. Cílem práce bylo odhadnout, zda rám tažného zařízení osobního vozu vydrží zatěžování dle metodiky CARLOS TC.

V teoretické části diplomové práce je popsána životnost z hlediska jednoosého, víceosého a náhodného zatěžování. Dále je stručně uvedeno, jak se postupuje při posuzování životnosti strojních součástí.

Třetí kapitola je věnována samotnému programu. Je zde popsán projekt FADOFF (Fatigue Analysis Documentation Office), který je řešen pod vedením autora programu a výsledkem by měla být komerční verze PragTicu. Hlavním cílem je zejména vývoj programu jak v komerční tak ve freewarové verzi. Tento projekt by měl být podporován Technologickou agenturou ČR až do roku 2014. V této kapitole je také podrobně popsáno uživatelské rozhraní a struktura programu se stručným popisem jednotlivých položek menu. Dále je vyobrazen soupis elementů použitelných v PragTicu a soupis některých predikčních kritérií rozdělených na napěťová, deformační a energetická.

Praktická část je součástí čtvrté kapitoly. Cílem mělo být stanovení životnosti rámu tažného zařízení, ale pro názornější použití programu PragTic byl přidán jeden příklad týkající se nízkocyklové únavy. Byla provedena simulace silově řízené únavové zkoušky na zkušebním tělese, které bylo zatěžováno cyklicky axiálně a torzně třemi sekvencemi. Analýza byla provedena v programu Ansys. Pro import dat byla použita automatizována metoda transferu dat (pomocí *.pti souboru). Aby bylo možné tento způsob importu dat provést, je nutné nastavení jak uživatelských proměnných operačního systému, tak Ansysu. Pro výpočet životnosti bylo zvoleno kritérium nízkocyklové únavy „Wang-Brown 93“ a výpočet byl spuštěn na všechny načtené uzly. Tento výpočet bylo nutné opakovat pro každou jednotlivou sekvenci. Největší poškození vyšlo u uzlu 567, kde míra poškození vychází v desítitisícinách. Výpočtem bylo zjištěno, že k iniciaci trhliny dojde při třetí sekvenci po absolvování 1781 cyklů. Při srovnání s experimentem je tato životnost 10 krát vyšší (ve třetí sekvenci). Nesoulad výsledků predikce a experimentu je způsoben zejména použitým modelem zpevnění Chaboche. Tento a další dostupné modely zpevnění v programu Ansys neumožňují zachycení efektu přídavného zpevnění v důsledku neproporcionálního namáhání, což má u uvažovaného materiálu zásadní vliv. Na druhou stranu použití Chabocheova nelineárního kinematického

pravidla zpevnění umožňuje zachycení ratchetingu, ke kterému u simulované zkoušky docházelo.

Dále byla provedena simulace zkoušky, která proběhla v podmínkách Škoda-Auto. Modelem je tažné zařízení osobního vozu. Cílem této zkoušky je testování, zda vydrží zadní rám tažného zařízení zatěžování dle metodiky CARLOS TC. Tažné zařízení je upevněno v tuhých upevňovacích přípravcích a postupně namáháno třemi zátěžnými moduly, které byly vytvořeny pomocí programu RPCPro. Každý modul představuje určitý styl jízdy, trvá různou dobu a liší se i počtem opakování. Celá tato zkouška trvá dohromady 92 hodin. Analýza byla provedena v programu Ansys Workbench. Bylo identifikováno kritické místo, kde bylo následně provedeno zhuštění konečnoprvkové sítě. Výpočet byl proveden pro jednotkové zatížení, pro každou sílu v jednotlivém směru zvlášť. Nejvyšší hodnota ekvivalentního napětí dosahuje 0.08 MPa. Import byl proveden manuální metodou (pomocí *.lis souboru). Na rozdíl od předchozího importu bylo potřeba postupně importovat soubory s uzly, elementy a jako poslední výsledkové soubory. Při importu zátěžné historie nelze importovat celý modul, ale musí se postupně načíst zatížení pro jednotlivé síly. Ty poté bylo potřeba v PragTicu upravit. Zátěžný režim byl nastaven pro každý modul zvlášť a vzhledem k charakteru zatěžování byla použita pro predikci LESA metoda. Byl identifikován kritický uzel, kde došlo k největšímu poškození. Výpočtem bylo zjištěno, že k poškození zadní části tažného zařízení během zkoušky dle metodiky CARLOS TC nedojde. Míra poškození dosahuje hodnoty 0.61, pokud se vezme v potaz, že celé zatěžování je složeno z jedné zkoušky. Bezpečnost lze považovat za dostačující, a proto není potřeba navrhovat žádné konstrukční změny. Na druhou stranu je nutné připomenout, že byla výpočtově posuzována pouze část tažného zařízení. Jestliže tento výpočet predikce životnosti porovnáme s experimentem, který proběhl v laboratořích Škoda – Auto, lze konstatovat správnost výpočtu, jelikož na dané části v poškození během celé zkoušky nedošlo. Výsledky jsou tedy v souladu s experimentem. Vzhledem k očekávanému progresivnímu vývoji PragTicu v nejbližší době, lze doporučit jeho použití pro dané účely v podmínkách Škoda – Auto. Je potřeba dodat, že tento program je zamýšlen především pro zkvalitnění a zjednodušení výzkumné práce. Oproti produktům jako jsou například FemFat, MSC.Fatigue, Fe-Safe a další, implementuje PragTic i metody které jsou novějšího data. Novější metody dosahují vyšší kvality predikce na velkém počtu experimentů shromážděných autorem programu (databáze FinLiv a FatLim). Současně s vývojem PragTicu bylo vyvíjeno i vlastní multiaxiální vysokocyklové kritérium, které rovněž v daném souboru dat poskytuje vynikající výsledky. Během roku 2012 by mělo být mimo jiné implementováno 15 nových

kritérií pro nízkocyklovou únavu. Závěrem lze říct, že PragTic prochází progresivním vývojem a jeho použití lze doporučit, ať už ve freewarové nebo připravované komerční verzi.

6. Seznam použité literatury

- [1] RŮŽIČKA M., HANKE M., ROST M., *Dynamická pevnost a životnost*, ČVUT Praha, 1987.
- [2] TREBUŇA F., ŠIMČÁK F. *Pružnost, pevnost a plastičnost*, Košice, 2005, 484s.
- [3] KLESNIL M., LUKÁŠ P., *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*, Praha, 1975.
- [4] KUČERA, J. *Stručný úvod do mechaniky lomu, Část 2 – Únava materiálu*, skripta FS VŠB-TU OSTRAVA, 1994.
- [5] RŮŽIČKA, M. *Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí*. Učební texty. Ústav mechaniky FS ČVUT Praha, říjen 1998.
- [6] HALAMA R., ADÁMKOVA L., FOJTÍK F., FRYDRÝŠEK K., ŠOFER M., ROJÍČEK J., FUSEK M., *Pružnost a pevnost*, skripta FS, OSTRAVA 2011
- [7] www.tacr.cz
- [8] CROSSLAND, B.: *Effect of large hydrostatic pressure on the torsional fatigue strength of an alloy steel*. In: Proc. Int. Conf. on Fatigue of Metals, Institution of Mechanical Engineers, London, 1956, pp. 138-149.
- [9] SINES, G.: *Failure of materials under combined repeated stresses with superimposed static stresses*. [NACA-TN-3495]. Washington, NACA 1955.
- [10] FINDLEY, W. N.: *Fatigue of Metals Under Combinations of Stresses*, Transactions of ASME (vol. 79), 1957.
- [11] MCDIARMID, D. L.: *A shear stress based critical-plane criterion of multiaxial fatigue failure for design and life prediction*. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct* 17, 1994, No. 12, pp. 1475-1484.
- [12] PAPADOPOULOS, I. V.; DAVOLI, P.; GORLA, C.; FILIPPINI, M.; BERNASCONI, A.: *A comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals*. *Int. J. Fatigue* 19, 1997, No. 3, pp. 219-235.
- [13] SPAGNOLI, A.: *A new high-cycle fatigue criterion applied to out-of-phase biaxial stress state*. *International Journal of Mechanical Sciences* 43, 2001, pp. 2581-2595.
- [14] PAPUGA, J.: *Mapping of Fatigue Damages – Program Shell of FE-Calculation*. [PhD thesis]. Prague, CTU in Prague 2005.
- [15] DANG VAN, K.: *Sur la résistance a la fatigue des métaux*. *These de Doctorat es Sciences, Sci. Techniq. l'Armement*, 47, 1973, p. 647.

- [16] PAPADOPOULOS, I. V.: *Fatigue polycyclique des métaux: Une nouvelle approche. [PhD thesis]*, Paris, École Nationale des Ponts et Chaussées 1987.
- [17] SOCIE, D. F.: *Critical plane approaches for multiaxial fatigue damage assessment. In: Advances in Multiaxial Fatigue*, ASTM STP 1191. Eds: D. L. Dowell and R. Ellis. Philadelphia, ASTM 1993. pp. 7-36.
- [18] POSPÍŠIL, B.: SKALA. *Programový komplex pro hodnocení pevnosti a Životnosti*. Brno 1993.
- [19] LANDGRAF, R.W. *The Resistance of Metals to Cyclic Deformation*. ASTM STP 467, 1970, pp. 3-36
- [20] WANG, C. H.; BROWN, M. W.: *A path-independent parameter for fatigue under proportional and nonproportional loading*. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 16 (1993), No. 12, pp 1285-1298.
- [21] SMITH, K.N. – WATSON, P. – TOPPER, T.H. *A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals*. Journal of Materials, 5, 1970, No. 4, pp. 767-778
- [22] BERGMANN, J.W; SEEGER, T.: *On the influence of cyclic stress-strain curves, damage parameters, and various evaluation concepts on the life prediction by the local approach*. VDI- Rep. of Progress 18, No 6, 1979.
- [23] ROBERTS, R.; ERDOGAN, F.: *The effect of mean stress on fatigue crack propagation in plates under extension and bending*. Trans. ASME, J. Basic. Engineering 89 (1967), pp. 885-892.
- [24] BANNANTINE, J. A.; SOCIE, D. F.: *A multiaxial fatigue life estimation technique. In: Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques*, ASTM STP 1122. Eds.: M. R. Mitchell and R. W. Landgraf. Philadelphia, ASTM 1992. pp. 249-275.
- [25] NIHEI, M.; HEULER, P.; BOLLER, C.; SEEGER, T.: *Evaluation of mean stress effect on fatigue life by use of damage parameters*. Int J Fatigue 8 (1986), No. 3, pp. 119-126.
- [26] FOJTÍK, F., FUXA, J.: *Conjugated strength criterion fit for fatigue loading of material*. ISBN 978-80-7372-483-2, Ostrava, str.99-104.

7. Seznam příloh

Příloha 1 – Makro pro export potřebných dat

Příloha 2 – Zátěžná historie dle metodiky CARLOS TC

Příloha 3 – Výpočet materiálových parametrů v programu MathCad pro zkušební těleso
nelineární metodou nejmenších čtverců (výpočet v oblasti nízkocyklové únavy)

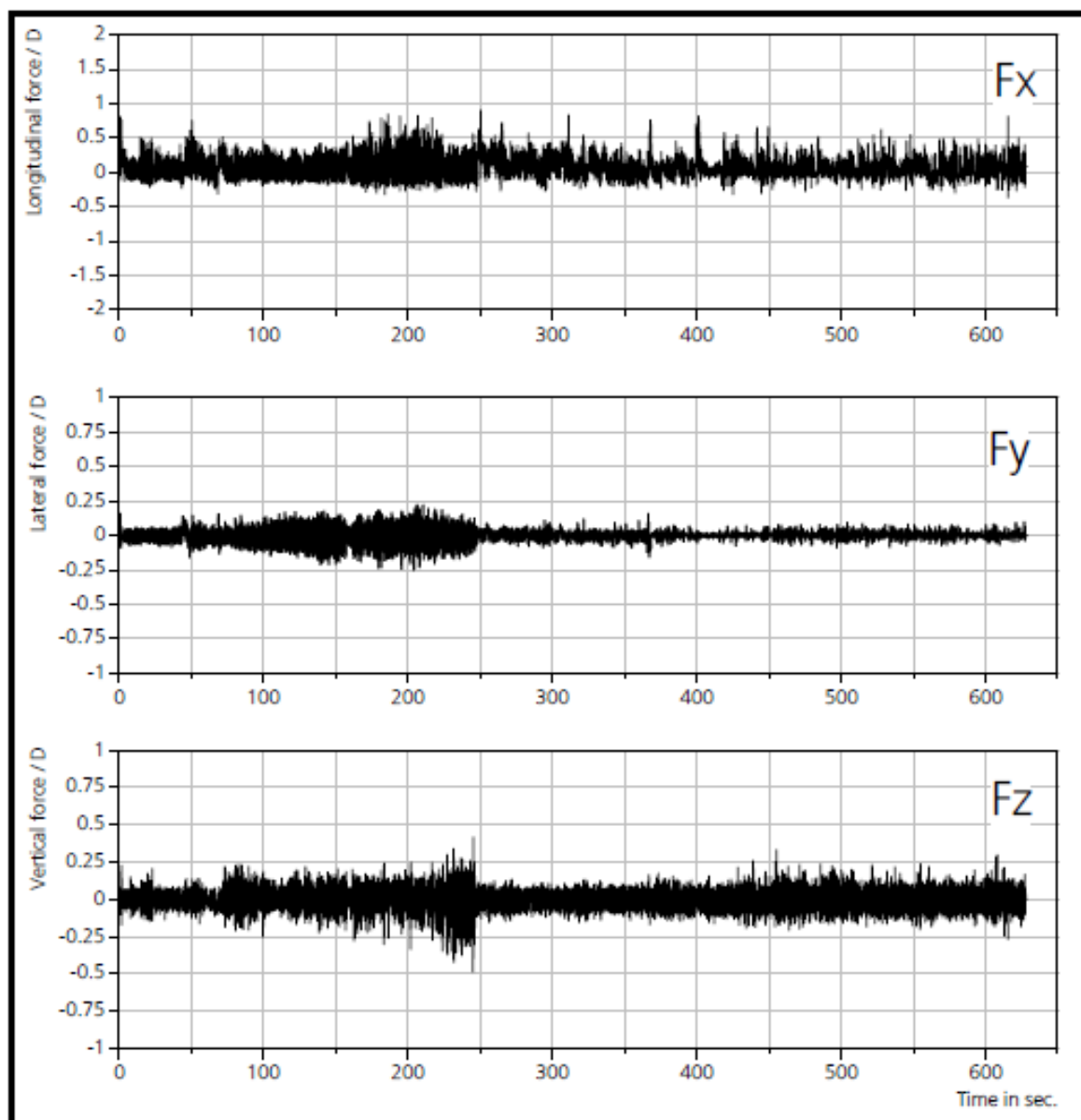
Příloha 4 – Výpočet materiálových parametrů v programu MathCad pro tažné zařízení
lineární metodou nejmenších čtverců (výpočet v oblasti vysokocyklové únavy)

Příloha 1 – Makro pro export potřebných dat

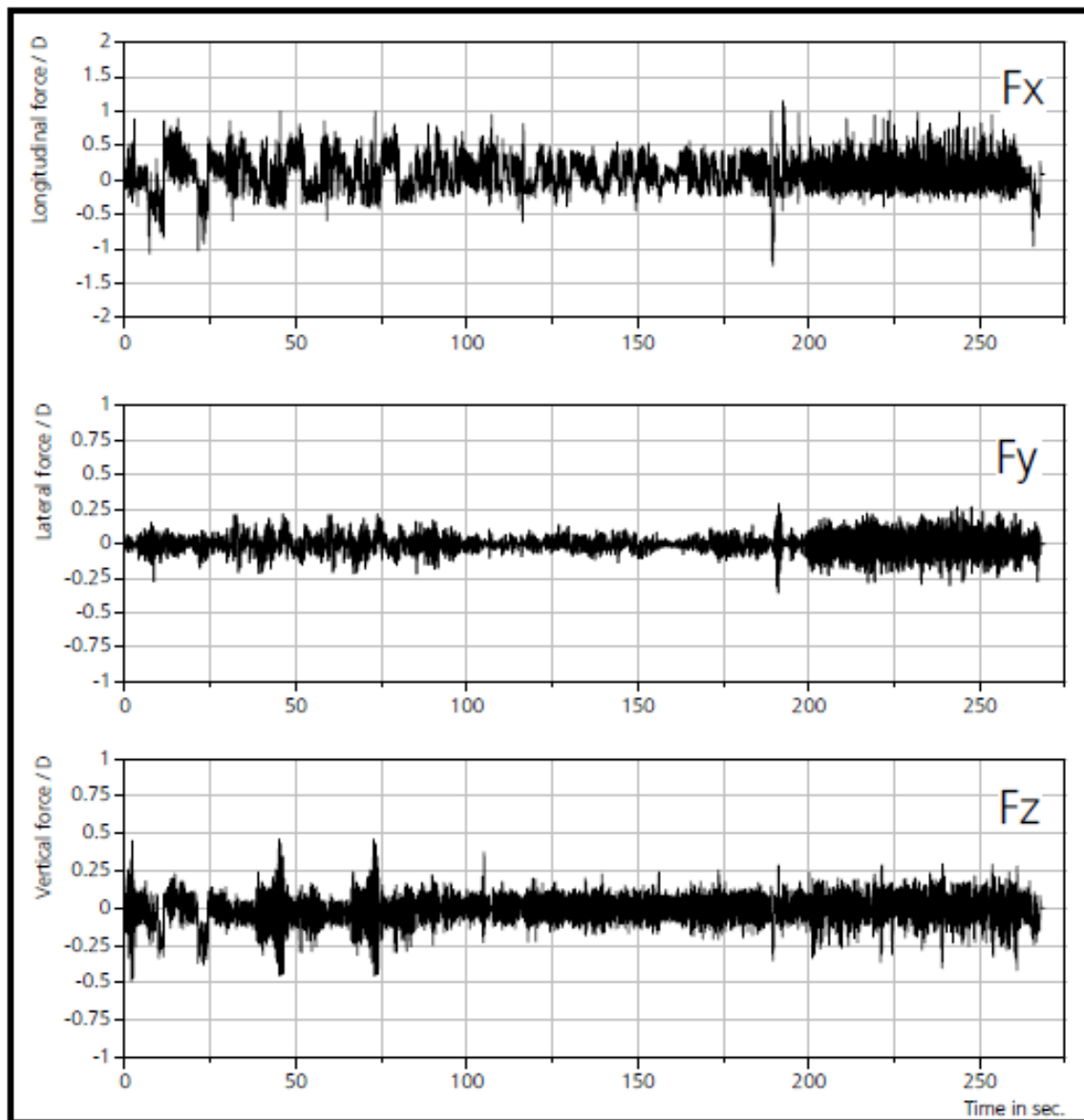
```
/PREP7
CMSEL,S,HRANA          *! selekce požadované části
NSLA,S,1
ESLN,S
/OUTPUT,UZLY,TXT        *! výpis informací o uzlech do textového souboru
NLIST
/OUTPUT,TERM
/OUTPUT,ELEMENTY,TXT    *! výpis informací o elementech do textového souboru
ELIST
/OUTPUT,TERM
/POST1                  *! přechod do postprocesoru
SET, LAST
/HEADER, OFF            *! vypnutí hlavičky
/OUTPUT,VYSLEDKY,TXT    *! výpis výsledků do textového souboru
PRNSOL,S,COMP
/OUTPUT,TERM
```

Příloha 2 – Zátěžná historie dle metodiky CARLOS TC

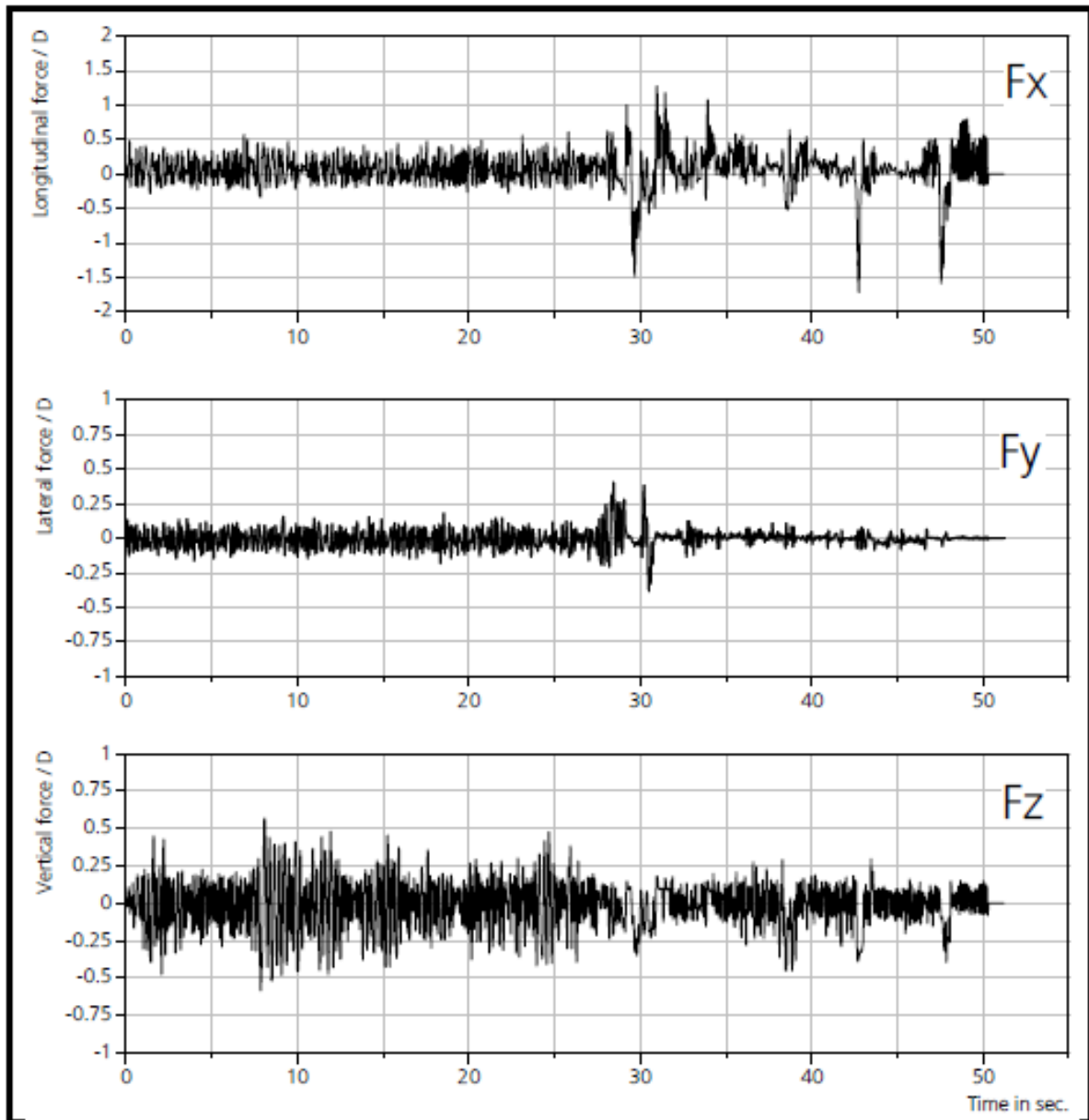
Modul 1



Modul 2



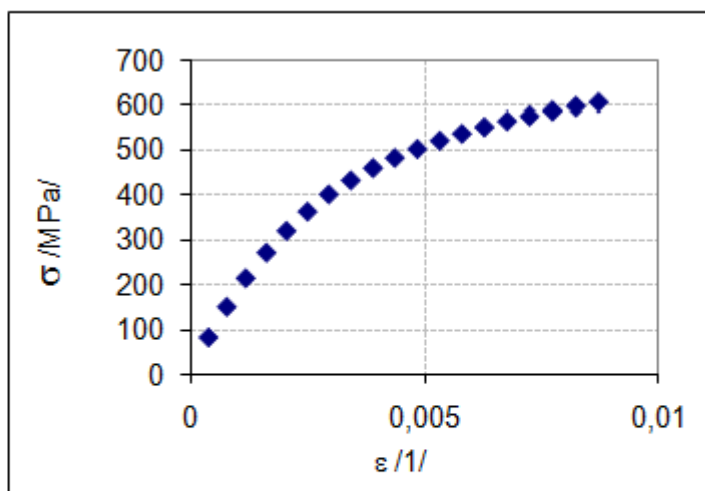
Modul 3



Příloha 3 – Výpočet materiálových parametrů v programu MathCad pro zkušební těleso
nelineární metodou nejmenších čtverců (výpočet v oblasti nízkocyklové únavy)

Zadané hodnoty:

ε	σ
/1/	/MPa/
0,000378	81,91178
0,000771	150,6388
0,001176	214,784
0,001619	272,1291
0,002048	320,7432
0,002498	364,1696
0,002955	402,7209
0,003425	434,2218
0,003901	461,656
0,004369	484,4093
0,004851	504,486
0,005328	522,9222
0,005803	538,3885
0,006284	553,0068
0,006771	566,0792
0,007253	577,0196
0,007741	587,9553
0,008242	597,3204
0,008728	606,1625



Převod experimentálních dat na hodnoty skutečného napětí a podélné logaritmické deformace.

$$\sigma_s := \overrightarrow{[\sigma \cdot (1 + \varepsilon)]}$$

$$\eta := \ln(1 + \varepsilon)$$

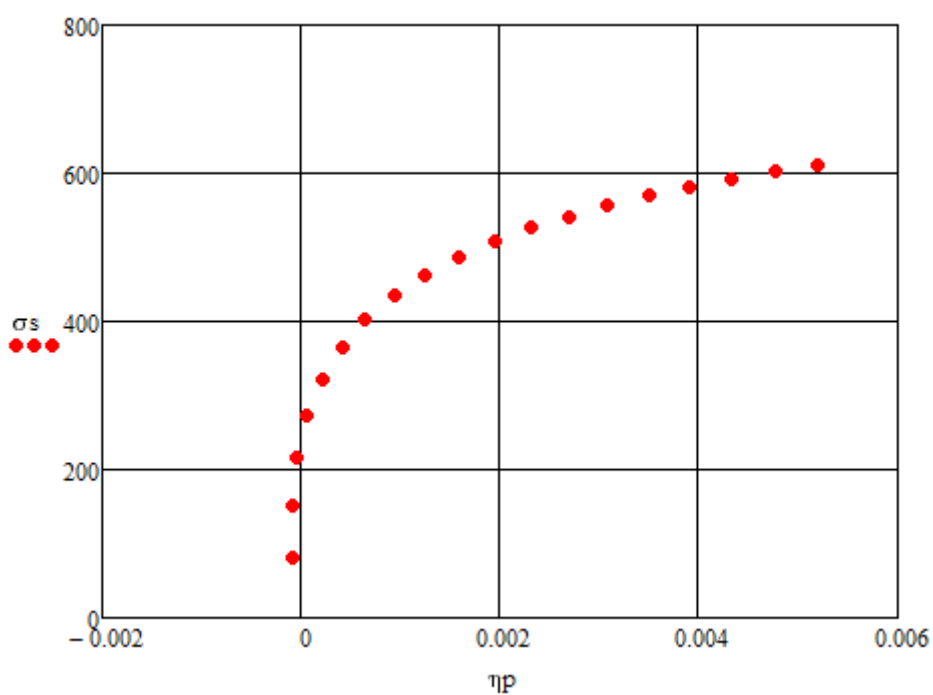
$$E := \frac{(\sigma_s T)^{\langle 0 \rangle} - (\sigma_s T)^{\langle 1 \rangle}}{(\eta T)^{\langle 0 \rangle} - (\eta T)^{\langle 1 \rangle}}$$

$$E = 1.752 \times 10^5$$

$$\eta_p := \eta - \frac{\sigma_s}{E}$$

$\sigma_s =$	0	81.943	$\eta =$	0	$3.779 \cdot 10^{-4}$	$\eta_p =$	0	$-8.979 \cdot 10^{-5}$
	1	150.755		1	$7.707 \cdot 10^{-4}$		1	$-8.979 \cdot 10^{-5}$
	2	215.037		2	$1.175 \cdot 10^{-3}$		2	$-5.21 \cdot 10^{-5}$
	3	272.57		3	$1.618 \cdot 10^{-3}$		3	$6.189 \cdot 10^{-5}$
	4	321.4		4	$2.046 \cdot 10^{-3}$		4	$2.114 \cdot 10^{-4}$
	5	365.079		5	$2.495 \cdot 10^{-3}$		5	$4.11 \cdot 10^{-4}$
	6	403.911		6	$2.951 \cdot 10^{-3}$		6	$6.452 \cdot 10^{-4}$
	7	435.709		7	$3.419 \cdot 10^{-3}$		7	$9.322 \cdot 10^{-4}$
	8	463.457		8	$3.893 \cdot 10^{-3}$		8	$1.248 \cdot 10^{-3}$
	9	486.526		9	$4.359 \cdot 10^{-3}$		9	$1.582 \cdot 10^{-3}$
	10	506.933		10	$4.839 \cdot 10^{-3}$		10	$1.946 \cdot 10^{-3}$
	11	525.708		11	$5.314 \cdot 10^{-3}$		11	$2.313 \cdot 10^{-3}$
	12	541.513		12	$5.786 \cdot 10^{-3}$		12	$2.695 \cdot 10^{-3}$
	13	556.482		13	$6.264 \cdot 10^{-3}$		13	$3.088 \cdot 10^{-3}$
	14	569.912		14	$6.748 \cdot 10^{-3}$		14	$3.495 \cdot 10^{-3}$
	15	...		15	...		15	$3.909 \cdot 10^{-3}$
							16	$4.329 \cdot 10^{-3}$
							17	$4.771 \cdot 10^{-3}$
							18	$5.2 \cdot 10^{-3}$

Závislost skutečného napětí na logaritmické plastické podélné deformaci



Nelineární metoda nejmenších čtverců – určení parametru Chabocheova modelu plasticity

$$\begin{aligned}
 \eta_{pa} &:= \eta_{p1} \cdot (-1) \\
 \eta_{pa} &= 0.00008979 \\
 \sigma_y &:= \frac{(\sigma_s T)^{\langle 2 \rangle} + (\sigma_s T)^{\langle 1 \rangle}}{2} & \sigma_y &= (182.896) \\
 & & \underline{\sigma_y} &:= 182.896 \\
 C1 &:= \frac{(\sigma_s T)^{\langle 3 \rangle} - (\sigma_s T)^{\langle 2 \rangle}}{(\eta_p T)^{\langle 3 \rangle} - (\eta_p T)^{\langle 2 \rangle}} & C1 &= 5.047 \times 10^5 \\
 C2 &:= \frac{(\sigma_s T)^{\langle 17 \rangle} - (\sigma_s T)^{\langle 18 \rangle}}{(\eta_p T)^{\langle 17 \rangle} - (\eta_p T)^{\langle 18 \rangle}} & C2 &= 2.145 \times 10^4 \\
 \gamma_1 &:= \frac{C1}{y - \sigma_y} & \gamma_1 &= 967.511
 \end{aligned}$$

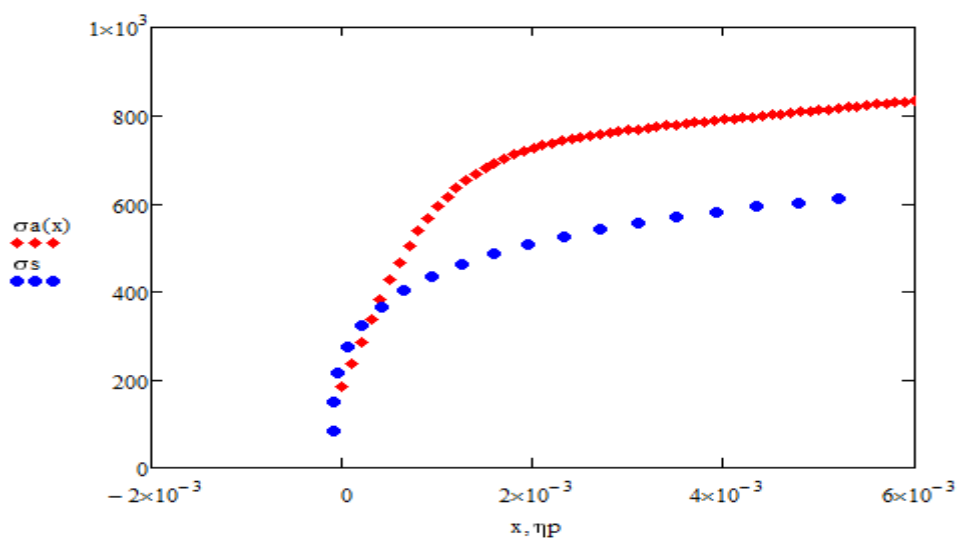
$$\begin{aligned}
 Ax &:= \eta_{p17} \\
 Ay &:= \sigma_{s17} \\
 Bx &:= \eta_{p18} \\
 By &:= \sigma_{s18} \\
 vx &:= Bx - Ax \\
 vy &:= By - Ay \\
 nx &:= vx \\
 ny &:= vy \\
 nx \cdot x + ny \cdot y + c &= 0 \\
 \underline{c} &:= -nx \cdot Ax - ny \cdot Ay \\
 c &= -0.303 \\
 y &:= \frac{(-nx \cdot 0 - c)}{ny} \\
 y &= 704.576
 \end{aligned}$$

+

Rovnice pro nelineární kinematický Chabocheův model plasticity

$$\sigma_a(x) := \sigma_y + \frac{C1}{\gamma_1} \cdot \tanh(\gamma_1 \cdot x) + C2 \cdot x$$

Srovnání experimentálně získaných dat s Chabocheovým modelem plasticity



Definice funkce a jejich derivaci

$$F(\eta p, b) := \begin{bmatrix} b_3 + \frac{b_0}{b_2} \cdot \tanh(b_2 \cdot \eta p) + b_1 \cdot \eta p \\ \frac{1}{b_2} \cdot \tanh(b_2 \cdot \eta p) \\ \eta p \\ \frac{-b_0}{(b_2)^2} \cdot \tanh(b_2 \cdot \eta p) + \frac{b_0}{b_2} \cdot (1 - \tanh(b_2 \cdot \eta p))^2 \cdot \eta p \\ 1 \end{bmatrix}$$

Počáteční volba parametrů

$$\text{volba} := \begin{pmatrix} C1 \\ C2 \\ \gamma 1 \\ \sigma y \end{pmatrix}$$

Výsledné řešení zpřesněných parametrů

$$\text{vysledky} := \text{genfit}(\eta p, \sigma s, \text{volba}, F)$$

$$\text{vysledky} = \begin{pmatrix} 5.551 \times 10^5 \\ 4.128 \times 10^4 \\ 2.57 \times 10^3 \\ 199.625 \end{pmatrix}$$

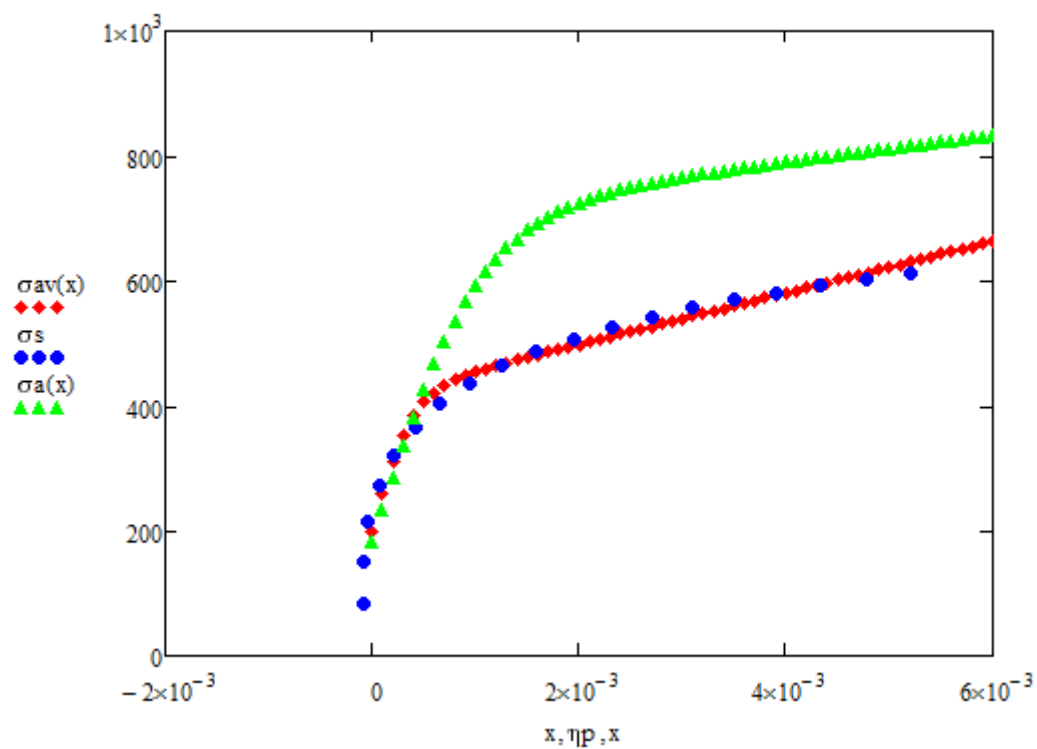
$$C1v := \text{vysledky}_0 \quad C1v = 555.114 \times 10^3$$

$$C2v := \text{vysledky}_1 \quad C2v = 41.276 \times 10^3$$

$$\gamma 1v := \text{vysledky}_2 \quad \gamma 1v = 2.5701 \times 10^3$$

$$\sigma yv := \text{vysledky}_3 \quad \sigma yv = 199.625$$

Grafické srovnání experimentálních dat σ_s , počátečního odhadu σ_a a zpřesněných výsledků σ_{av}



Příloha 4 – Výpočet materiálových parametrů v programu MathCad pro tažné zařízení
lineární metodou nejmenších čtverců (výpočet v oblasti vysokocyklové únavy)

data :=

	0	1
0	296.19	$2.856 \cdot 10^4$
1	265.08	$2.355 \cdot 10^5$
2	242.03	$8.01 \cdot 10^5$

$\sigma_{a1} := \text{data}^{(0)}$

$Nf1 := \text{data}^{(1)}$

$$\sigma_{a1} = \begin{pmatrix} 296.19 \\ 265.08 \\ 242.03 \end{pmatrix} \quad Nf1 = \begin{pmatrix} 2.856 \times 10^4 \\ 2.355 \times 10^5 \\ 8.01 \times 10^5 \end{pmatrix}$$

$\sigma_a := \log(\sigma_{a1})$

$Nf := \log(Nf1)$

$$\sigma_a = \begin{pmatrix} 2.472 \\ 2.423 \\ 2.384 \end{pmatrix} \quad Nf = \begin{pmatrix} 4.456 \\ 5.372 \\ 5.904 \end{pmatrix}$$

$a := \text{slope}(Nf, \sigma_a)$

$b := \text{intercept}(Nf, \sigma_a)$

$Wf1 := \text{slope}(\sigma_a, Nf)$

$a = -0.06$

$b = 2.739$

$Wf1 = -16.6$

$y(x) := a \cdot x + b$

